

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie de l'environnement

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA
POLLUTION DE L'AIR PAR LE NO₂ DANS LE
GRAND ALGER**

Présenté par :

Melle LOUNI Meriem

Dirigé par : Mr. R.KERBACHI, Professeur, ENP

Co-promoteur : Mr. A.BOUKADOUM, Sous-Directeur MATEV

Présidé par : Mr. A. NAMANE MCA

Examiné par : Mr. Y.KERCHICHE, Maître assistant, U.Médéa

Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hacén Badi,
El-Harrach, Alger.
Tel: 021 52 14 94 Fax: 021 52 29 73

Promotion 2014

Résumé :

Nous avons contribué à l'étude de la pollution de l'air par le NO₂ sur vingt sites différents.

Deux campagnes de mesure d'une période d'une semaine chacune ont été réalisées par voie d'échantillonneurs passifs

Les résultats obtenus ont montré que la principale source émettrice de polluants est le trafic routier et le secteur industriel dont on a enregistré des valeurs allant jusqu'à 68 µg/m³.

Nous avons constaté que les conditions météorologiques influent sur le taux d'émission des NO₂, en effet les précipitations constituent un puit du polluant et le vent favorise sa dispersion.

Les teneurs les plus faibles ont été enregistrés dans les sites semi_urbains.

Notre étude a montré que les teneurs en NO₂ sont en croissante et cela est dû à l'amplification du parc automobile.

Mots clés : pollution atmosphérique, NO₂, teneur, trafic routier, Alger. Site, émission

Abstract:

We contributed to the study of air pollution by NO₂ in twenty different sites.

The passive sampling method was employed to measure the concentration of NO₂ within two experimental sampling campaigns.

The results showed that the main source emitting pollutants is road traffic and industry which was recorded values up to 68 ug/m³.

Weather conditions affect the rate of emission of NO₂, precipitation is indeed a well of the pollutant and the wind favors its dispersion.

The lowest levels were recorded in the background sites.

This study highlights that urban road traffic is the main source of NO₂ emissions but also that these emissions highly increased during the last years.

Keywords: air pollution, NO₂, content, traffic, Algiers. Site, emission

ملخص

دراسة التلوث الجوي بالثاني اوكسيد الازوت بالعاصمة على مر حائتين سمحت لنا بتحليل كمية ثاني اوكسيد الازوت.

بعد التحليل لحضنا ان معدل التركيز الاعلى لثاني اوكسيد الازوت في المناطق القريبة من حركة المرور ونحصل على اعلي قيمة ميكرو غرام /م³ 68

هذه الدراسة أظهرت لنا أنّ حركة المرور هي مصدر الرئيسي للثاني أكسيد الأزوت

الكلمات المفتاحية

تلوث الهواء، تركيز، حركة المرور، الجزائر العاصمة ثاني أكسيد الأزوت

Remerciements

Tout d'abord louange à dieu tout puissant qui m'a donné toutes les capacités physiques et morales pour la réalisation du présent travail.

Un grand merci à mon directeur de mémoire, le Professeur KERBACHI Rabah.

Je le remercie bien évidemment pour le temps qu'il m'a accordé et pour les précieux conseils qu'il m'a donnés.

Je tiens à remercier le Professeur A.NAMANE pour m'avoir fait l'honneur de juger mon travail.

Je remercie le Professeur Mr. Y.KERCHICHE d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier mon Co-promoteur Mr A. BOUKADOUM, pour son aide et ses conseils.

Je tiens à remercier notre ingénieure de laboratoire Melle TOUAHRIA Ahlem qui m'a beaucoup aidée à réaliser ce modeste travail.

Un grand merci à ma mère, à mes deux chères sœurs Nesrine et Nawel ainsi qu'à mon petit frère Khaled qui m'ont beaucoup soutenue.

Mes sincères remerciements vont aussi à mes amis et camarades de promotion, Amina, Ghanou, Imen, Rahim et Salim pour leur précieux soutien, sans oublier Magnola et Mme Hamida, la secrétaire de notre département.

J'adresse mes plus vifs remerciements pour tous les professeurs du département du Génie de l'Environnement qui ont contribué à ma formation.

Enfin, tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

A mon père, paix à ton âme...

TABLE DES MATIERES

CHAPITE I GENERALITES SUR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

INTRODUCTION GENERALE

I.	Généralités sur l'air et l'atmosphère	2
I.1	Les couches atmosphériques	2
I.2	Les principaux constituants de l'air pur	3
I.3	Les principaux polluants de l'air	4
I.3.1	La pollution d'origine naturelle	4
I.3.2	La pollution d'origine anthropique	4
I.3.2.1	Les polluants primaires	4
	A. Le monoxyde de carbone CO	4
	B. Le dioxyde de soufre SO ₂	5
	C. Les oxydes d'azote	5
	D. Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	6
	E. Les composés organiques volatils (COV)	6
	F. Les particules fines (PM ₁₀ et PM _{2.5})	6
	I. Les métaux lourds	7
I.3.2.2	Les polluants secondaires	7
	A. L'ozone O ₃	8
I.4	Facteurs influençant la diffusion des polluants	8
I.4.1.	L'absence de vent	8
I.4.2.	L'inversion des températures	8
I.4.3	La topographie	9
I.4.4	Les phénomènes de brise	9

I.4.5	L'ensoleillement	9
I.4.6	La pluie et les gouttelettes de brouillard	9

CHAPITRE II

LA POLLUTION PAR LE DIOXYDE D'AZOTE

II.	La pollution par le dioxyde d'azote	11
II.1	Structure du NO ₂	11
II.2	Propriétés physiques et chimiques du NO ₂	11
II.3	Formation du dioxyde d'azote	12
II.4	Les sources d'émissions du NO ₂	16
II.4.1	les sources anthropiques	16
II.4.1.1	Le trafic routier	16
II.4.1.2	Les industries	18
II.4.1.3	Le secteur résidentiel	18
II.4.2	Les sources naturelles	18
II.5	Effets sur la santé	19
II.6	Effets sur l'environnement	20
II.6.1	Impacts des pluies acides sur la flore	20
II.6.2	Impacts des pluies acides sur les matériaux	20
II.7	Normes et directives	21

CHAPITRE III

THECHNIQUES DE PRELEVEMENT ET D'ANALYSE DU NO₂

III.1	Technique de prélèvement du NO ₂	24
III.1.1	Méthode de Griess-Saltzman: Prélèvement dynamique et absorption des NO _x	24
III.1.2	Prélèvement passif	24

III.1.2.1 Les échantillonneurs Radiello	24
III.1.2.2 Principe des tubes à diffusion	25
III.2 Méthodes d'analyse du dioxyde d'azote	28
III.2.1 Méthode spectrométrique	28
III.2.2 Méthode chromatographique	28
III.2.3 La chimiluminescence	28

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIES EXPERIMENTALE

IV. Méthodologie	32
IV.1 Présentation des tubes Radiello	32
IV.1.1 La cartouche adsorbante	32
IV.1.2 Le corps diffusif	32
IV.1.3 La plaque de support	33
IV.2 Préparation des tubes passifs	33
IV.3 Choix et description des sites de prélèvement	34
IV.3.1 Critères de sélection des sites	34
IV.3.2 Présentation des sites sélectionnés: Situation géographique et classification	34
IV.4 Organisation des campagnes de mesures	43
IV.5 Désorption et analyse des échantillons	43
IV.5.1 Dosage des nitrites	43
IV.5.2 Analyse des échantillons	43
IV.6 Calcul des teneurs atmosphériques	44

CHAPITRE V
RESULTATS ET DISCUSSION

V.1 Résultats des deux séries de mesure	46
V.1.1 Analyse des données météorologiques de la ville d'Alger	48
V.1.2 Discussion des résultats obtenus pour les sites urbains	50
V.1.3 Discussion des résultats obtenus pour les sites de fond « semi-urbains »	53
V.1.4 Discussion des résultats obtenus pour les stations trafic	55
V.2 Comparaison des résultats obtenus aux normes	59
V.3 Comparaison des teneurs atmosphériques en NO ₂ avec d'autres résultats	60
V.3.1 Comparaison avec des données de la localité d'Alger	60
V.3.2. Comparaison des teneurs mesurés avec des résultats d'autres pays	61
Conclusion	63
Annexe	64
Bibliographie	65

Liste des figures :

Figure n°01 : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre	3
Figure n°02 : Structure du NO ₂	11
Figure n°03 : Cycle de Chapman	14
Figure n°04 : Schématisation de la production d'ozone en phase gazeuse	16
Figure n°05 : Cycle de l'azote	18
Figure n°06 : Asthme	19
Figure n°07 : Cancer du poumon	19
Figure n°08 : Echantillonneur radial	25
Figure n°09 : Schématisation de la diffusion moléculaire	25
Figure n°10 : Echantillonneur Radiello	32
Figure n°11 : La cartouche adsorbante	32
Figure n°12 : Le corps diffusif	33
Figure n° 13: Localisation des différents sites de prélèvement du NO ₂ à Alger	37
Figure n°14. S1 : Site de prélèvement au Ministère des Ressources en Eau Kouba.	38
Figure n°15. S2 : Site de prélèvement au parc d'el hamma	38
Figure n°16. S3 : Site de prélèvement Reghaia	39
Figure n°17 : S4.1 : Poste de prélèvement à Bab el Oued	39
Figure n°18 : S4.2 : Site de prélèvement à Bab el oued	40
Figure n°19: S7 : Poste de prélèvement à l'école nationale polytechnique d'Alger	40
Figure n°20 : S8 : Poste de prélèvement à l'Office National de la Météorologie	41
Figure n°21 : S10: Poste de prélèvement à l'hôpital CHU Mustapha Pacha d'Alger	41
Figure n°22 : S12 : Poste de prélèvement au Centre De Développement Des Energies Renouvelables Cder " Bouzaréah"	42
Figure n°23 : S17 : Poste de prélèvement à Hassen Badi Belfort el Harrach	42
Figure n°24 : Variation des teneurs atmosphériques en NO ₂ (Campagne n°1)	47
Figure n°25: Variation des teneurs atmosphériques en NO ₂ (Campagne n°2)	48
Figure n°26 : Variation des teneurs atmosphériques moyennes en NO ₂	48
Figure n°27 : Variation des teneurs atmosphériques en NO ₂ pour les sites urbains (campagne n°01)	52
Figure n°28 : Variation des teneurs atmosphériques en NO ₂ pour les sites urbains (campagne n°02)	52
Figure n°29 : Variation des teneurs atmosphériques en NO ₂ pour les sites semi-urbains (campagne n°01)	54
Figure n°30 : Variation des teneurs atmosphériques en NO ₂ pour les sites semi-urbains (campagne n°02)	54

Figure n°31 : Variation des teneurs atmosphériques moyennes en NO2 pour les sites semi-urbains	54
Figure n°32 : Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les stations trafic (Campagne n°01)	56
Figure n°33: Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les stations trafic (Campagne n°02)	56
Figure n°34 : Variation des teneurs atmosphériques moyennes en NO2 pour les stations trafic routier	57
Figure n°35 : Teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites (campagne n°01)	57
Figure n°36 : Teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites (campagne n°02)	58
Figure n°37 : Teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites pour les deux campagnes	58
Figure n°38 : Comparaison des teneurs atmosphériques moyennes en NO2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec la norme de l'OMS	59

Liste des tableaux :

Tableau n°01 : Principaux constituants de l'air pur	3
Tableau n°02 : Propriétés physico-chimiques du NO ₂	12
Tableau n°03 : les Valeurs guides de l'OMS et normes algériennes et EU du NO ₂ .	21
Tableau n°05 : Situation géographique et classification des zones d'études	35
Tableau n°06 : Teneurs atmosphériques du NO ₂ en (ppb) des différents sites des deux campagnes de mesure	46
Tableau n°7 : Données météorologiques de la campagne de mesure n°01	49
Tableau n°8 : Données météorologiques de la campagne de mesure n°02	49
Tableau n°9 : Résultats des teneurs atmosphériques en NO ₂ des sites urbains	50
Tableau n°10: Résultats des teneurs atmosphériques en NO ₂ des sites semi urbains pour les deux campagnes de mesure	53
Tableau n°11 : Résultats des teneurs atmosphériques en NO ₂ des sites de trafic routier (campagne n°02)	55
Tableau n°12 : Résultats des teneurs atmosphériques en NO ₂ des sites de trafic routier (campagne n°02)	55
Tableau n°13 : Teneurs en NO ₂ en µg/m ³ mesurées par le réseau Samasafia	60
Tableau n°14: Teneurs de NO ₂ mesurées dans certains pays.	61

Liste des abréviations

NOX : Oxydes d'azote

NO₂ : Dioxyde d'azote

NO : Monoxyde de carbone

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

SO₂ : Dioxyde de soufre

HAO : Hydrocarbure aromatique polycyclique

BTEX : Benzène, toluène, éthylbenzène, xylène

TEA : triéthanolamine

OMS : Organisation mondiale de la santé

INTRODUCTION :

Une importante variété de substances polluantes dont certaines sont rejetées dans l'atmosphère est issue de l'activité humaine.

Les polluants atmosphériques sont des composés qui, lorsqu'ils sont présents dans l'air en quantité suffisante, peuvent mettre en danger la santé et causer des dommages tant aux matières vivantes qu'aux matériaux.

Les sources des polluants de l'air sont principalement les industries, les transports, les activités domestiques, l'agriculture et les phénomènes naturels.

Sous l'effet de certains facteurs, ces polluants sont transportés plus ou moins loin de la source et peuvent donc affecter de grandes étendues et contribuer à la dégradation générale de l'atmosphère terrestre.

Les principaux polluants atmosphériques se classent en deux grandes familles bien distinctes, les polluants primaires et les polluants secondaires. Les polluants primaires sont issus de sources diverses telles que le trafic routier, les chauffages, les industries, l'agriculture et plusieurs sources diffuses. Il s'agit essentiellement de l'oxyde de carbone CO, du dioxyde de soufre SO₂, des oxydes d'azote NO_x, des hydrocarbures lourds, des composés organiques volatils COV, des particules fines PM 10 et PM 2.5 ainsi que des métaux lourds (plomb, mercure, cadmium, etc.) [1].

Les polluants secondaires, par contre, ne sont pas émis directement par les activités humaines, mais résultent de transformations chimiques dans l'atmosphère. C'est le cas notamment pour les particules secondaires (sulfates, nitrates, ammonium), l'ozone O₃ et la majeure partie du dioxyde d'azote NO₂.

Le NO₂ est un polluant atmosphérique qui exerce des effets irritants sur l'être humain et qui contribue à la formation des pluies acides. Comme pour l'ozone, sa production augmente de manière proportionnelle avec l'augmentation de la concentration de précurseurs, NO et COV. C'est donc en présence d'épisodes de pollution photochimique qu'on mesure les teneurs en NO₂ les plus élevées.

Le NO₂ fait partie des polluants atmosphériques qui sont réglementés. Généralement, les industries et les villes, qui sont dotées d'un réseau de surveillance, sont équipées d'analyseurs automatiques de NO_x dont le fonctionnement est basé sur la chimiluminescence [2].

Ces dernières années, le suivi des teneurs en dioxyde d'azote se fait de plus en plus par l'utilisation d'échantillonneurs passifs. Dans cette technique, le mode d'échantillonnage est basé sur le principe de la diffusion moléculaire du polluant vers un adsorbant où il est capté [3].

Contrairement aux stations de mesure en continu, dont le nombre est réduit, cette technique permet de couvrir une large zone géographique et ainsi d'atteindre un niveau d'information élevé sur la répartition spatiale d'un polluant sur la zone. Elle permet notamment d'équiper un nombre important de sites sans coût excessif car elle ne nécessite pas de pompe d'aspiration et donc pas d'alimentation électrique.

La ville d'Alger abrite environ un million et demi de véhicules et sa population croît fortement. Elle compte actuellement environ 3.5 millions d'habitants, ce qui induit de très fortes émissions de polluants atmosphériques comme les NOx [4].

Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air ne sont pas développés en Algérie. Alger a été certes équipée en 2003 de quatre stations de mesure, mais ces dernières ont connu beaucoup de problèmes de maintenance et d'étalonnage et sont à l'arrêt actuellement.

Le réseau de Annaba fonctionne par intermittence et les réseaux de mesure prévus pour les villes d'Oran et de Skikda ne sont pas encore opérationnels.

Pour pallier à ces insuffisances, la méthode des échantillonneurs passifs est idéale pour avoir les premières informations sur la qualité de l'air de la ville.

Diverses études ont montré qu'en milieu urbain, le trafic routier est la principale source de la dégradation de la qualité de l'air. C'est le cas également de la ville d'Alger où le parc automobile a connu ces dernières années une croissance effrénée (Plus de 20% entre 2010 et 2013) [5].

Il en résulte certainement une forte augmentation du taux de pollution et particulièrement des émissions du dioxyde d'azote.

Face à cette situation, on s'est intéressé dans ce travail à l'évaluation de la pollution de l'air par le NO₂ dans la région d'Alger. Le suivi a été réalisé au niveau d'une vingtaine de sites par la méthode de diffusion passive. L'objectif étant d'identifier les zones à forte pollution qui doivent faire l'objet d'une surveillance accrue.

CHAPITRE 01 :

**GENERALITES SUR LA POLLUTION
ATMOSPHERIQUE**

I- GENERALITES SUR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'atmosphère. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions de rejets polluants ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, la diffusion et les retombées de ces mêmes polluants. L'étude de la structure de l'atmosphère est importante pour la compréhension de certains phénomènes de la pollution atmosphérique

I.1 Les couches atmosphériques :

L'atmosphère est la couche d'air qui entoure la terre, elle est composée de quatre couches (Figure n°01) :

- **La troposphère** : C'est la couche d'air la plus proche de notre planète, elle s'étend jusqu'à une altitude de 10 km. Elle est caractérisée par la décroissance de la température avec l'altitude de 6 à 7°C en moyenne par kilomètre et représente 80 à 85 % de la masse de l'atmosphère. C'est dans les basses couches de la troposphère qu'on retrouve les polluants atmosphériques classiques.
- **La stratosphère** : Elle s'étend jusqu'à 50 km d'altitude. La couche d'ozone protectrice est formée dans la stratosphère; son rôle est de protéger la terre des rayonnements ultraviolets de très courtes longueurs d'ondes.. Contrairement à la troposphère, la température augmente avec l'altitude, en raison de l'interception du rayonnement solaire par les molécules d'ozone. Seuls les polluants à très longue durée de vie, tels que les chlorofluorocarbones CFC peuvent arriver à la stratosphère.
- **La mésosphère** : Elle se trouve entre 50 et 85 km d'altitude et ne joue aucun rôle dans la pollution atmosphérique
- **La thermosphère** : C'est la dernière couche qui se trouve à une altitude au-dessus de 85 km. Au-delà, la force d'attraction de la terre est négligeable et dans l'exosphère (au-delà de 400 à 500 km), l'hydrogène atomique peut s'échapper vers l'espace [6].

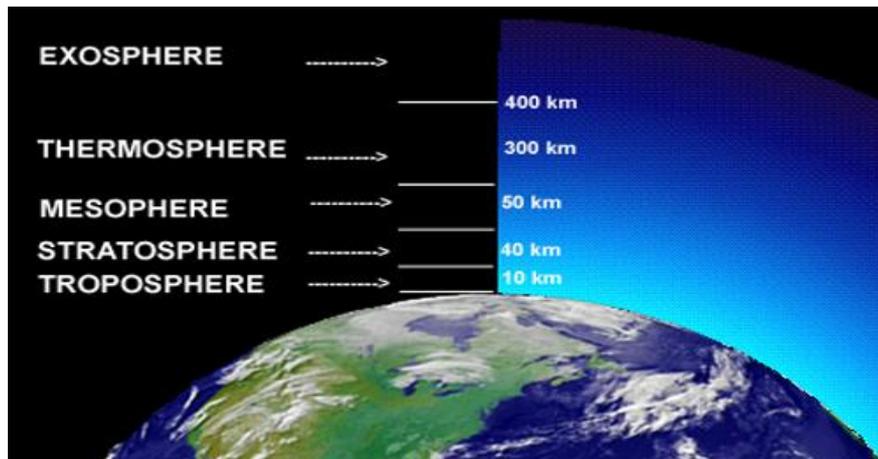


Figure01 : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre

I.2 Les principaux constituants de l'air pur :

L'air est pur lorsqu'il ne contient pas d'autres substances que celles qui entrent dans sa composition naturelle et dans les proportions indiquées dans le tableau n°01, ceci en fraction molaire, au niveau de la mer, à une température de 15°C et à une pression de 101325 Pa.

La plupart des polluants sont émis dans la troposphère où ils subissent de nombreuses réactions et interagissent entre eux [7].

Tableau n°01 : Principaux constituants de l'air pur [6].

Constituant	Symbole	Fraction Molaire
Azote	N ₂	780000 ppmv*
Oxygène	O ₂	210000 ppmv
Argon	Ar	9300 ppmv
Dioxyde de carbone	CO ₂	365 ppmv
Ozone	O ₃	1 ppbv** - 10 ppmv
Méthane	CH ₄	1.8 ppmv
Protoxyde d'azote	N ₂ O	314 ppbv

*ppmv : parties par million en volume **ppbv : parties par billion (milliard) en volume

I.3) Les principaux polluants de l'air :

Il y a pollution de l'air lorsqu'il y a présence d'une substance étrangère ou bien une variation importante dans les proportions de ses composants qui peuvent être susceptible de provoquer un effet nocif à l'être humain et à son environnement.

Les sources de pollution sont diverses. Elles peuvent être d'origine naturelle ou anthropique [6].

I.3.1) La pollution d'origine naturelle :

C'est la pollution qui ne provient pas de l'activité humaine, on distingue comme polluants naturels :

- Les poussières dues à l'érosion du sol
 - Les poussières et les gaz d'origine volcanique
 - La pollution d'origine végétale, animale ou microbienne
 - Les poussières d'origines extraterrestres
 - Les feux de fumées et d'incendies
 - Les composés engendrés par les foudres
 - Les brumes et les sels marins, une pollution très courante dans les régions côtières, ou l'air contient des aérosols contenant du NaCl du MgCl₂ et du CaCl₂
- Les émissions d'origine naturelle sont en quantité plus importantes que celles d'origine humaine, mais cette pollution naturelle ne touche pas les grands centres urbains et elle est répartie sur toute la planète [6].

I.3.2) La pollution d'origine anthropique :

C'est la pollution qui est liée directement ou indirectement aux activités humaines. Il existe deux grandes familles de polluants d'origine anthropogénique, les polluants primaires et les polluants secondaires [7].

I.3.2.1) Les polluants primaires :

Les polluants primaires sont émis directement dans l'atmosphère. Ils sont issus de sources diverses telles que le trafic routier, le chauffage, les industries, l'agriculture, etc. Il s'agit essentiellement des polluants suivants :

A) Le monoxyde de carbone (CO) : Le monoxyde de carbone est difficilement décelable car c'est un gaz incolore, inodore et sans saveur. Il est le produit de la combustion incomplète de matières organiques (gaz, charbon, fioul, carburants, bois) [7] .

Sources : Trafic routier, appareils de chauffage domestique et diverses industries.

Effets sur la santé :

Le CO a la capacité de se fixer sur l'hémoglobine du sang à la place de l'oxygène conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux du cœur et des vaisseaux sanguins.

Les premiers symptômes de l'intoxication sont les seuls signaux d'alarme : Maux de tête, une vision floue, des malaises légers, des palpitations.

Si les concentrations de CO sont élevées, l'intoxication se traduit par des nausées, des vomissements, des vertiges ou, plus grave, un évanouissement puis la mort. La gravité de l'intoxication dépend de la quantité de CO fixé par l'hémoglobine. Elle est donc liée à plusieurs facteurs : la concentration de CO dans l'air, la durée d'exposition et le volume respiré.

Effets sur l'environnement :

Le monoxyde de carbone participe à la formation de l'ozone troposphérique. Son oxydation aboutit à la formation de dioxyde de carbone, composé reconnu comme étant l'un des principaux gaz à effet de serre.

B) Le dioxyde de soufre (SO₂) : Il provient de la combustion des composés soufrés présents à l'état d'impureté dans les combustibles fossiles (Charbon, pétrole, diesel...). La majeure partie de ce soufre est émis dans l'atmosphère sous forme de SO₂ [7].

Sources :

Les industries sidérurgiques, la métallurgie des métaux non ferreux, l'industrie chimique, les activités pétrolières et le trafic routier.

Effets sur la santé : Le dioxyde de soufre est un gaz irritant, notamment pour l'appareil respiratoire. Les fortes pointes de pollution peuvent déclencher une gêne respiratoire chez les personnes sensibles (asthmatiques, jeunes enfants...). Les efforts physiques intenses accroissent les effets du dioxyde de soufre. Son pouvoir nocif augmente en présence de la pollution par les poussières.

Effet sur l'environnement :

Dans l'atmosphère, le dioxyde de soufre se transforme principalement en acide sulfurique, qui se dépose au sol et sur la végétation. Cet acide contribue, en association avec d'autres polluants, à l'acidification et à l'appauvrissement des milieux naturels. Il participe aussi à la détérioration des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments (pierre, métaux).

C) Les oxydes d'azote NO_x : Le monoxyde d'azote NO se forme par réaction chimique entre l'azote N₂ et l'oxygène O₂ de l'atmosphère lors des combustions à haute température.

Ce polluant est émis par toutes les activités où règnent des températures élevées. C'est le cas par exemple des installations de chauffage, des centrales thermiques de production d'électricité, les usines d'incinération, des cimenteries et du trafic routier [8].

Effets : Le NO peut s'oxyder rapidement et former le dioxyde d'azote NO₂ qui est un polluant qui exerce des effets néfastes sur l'être humain (pouvoir irritant très élevé) et son environnement. Le NO₂ participa à la formation de la pollution acide. Par ailleurs, les NO_x constituent des précurseurs de la formation de l'ozone dans la troposphère.

D) Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) :

Ils proviennent majoritairement de la combustion incomplète du charbon et des produits pétroliers.

Ils sont aussi émis par le secteur résidentiel tertiaire et dans une moindre mesure par les secteurs agricole et industriel.

En ville, les principaux producteurs d'hydrocarbures sont les véhicules diesel [9].

Effets : Associés aux poussières, les HAP peuvent pénétrer dans les alvéoles pulmonaires, ce sont des agents cancérigènes.

E) Les composés organiques volatils (COV) : Ils sont émis lors de la combustion des énergies fossiles ou par évaporation lors de leur fabrication, stockage ou utilisation [10].

Effets sur la santé :

Les COV peuvent directement provoquer des irritations sensorielles, des manifestations plus sévères telles que les troubles cardiaques et digestifs ou les effets cancérigènes. Le benzène est cancérigène

I.1. Effets sur l'environnement :

I.2.

L'impact environnemental des COV est lié à leur réactivité chimique avec les composés gazeux de l'atmosphère. Ils jouent un rôle majeur dans la formation de l'ozone troposphérique et interviennent dans le processus conduisant à la formation des gaz à effet de serre.

F) Les particules fines (PM10 et PM2.5) :

Les PM-10 et les PM-2.5 représentent les catégories de particules dont les diamètres sont respectivement inférieurs à 10 et 2,5 micromètres.

Ils proviennent de la combustion de combustibles fossiles. Des particules sont ainsi rejetées par les installations de chauffage domestique (chauffage au fioul, chauffage au bois...) et urbain, les centrales électriques, les usines d'incinération des déchets et les véhicules à moteur, notamment diesel. Certains procédés industriels, tels la fabrication de ciments et d'engrais, la métallurgie, l'extraction de minerais ou la

manutention et le transport de matériaux pulvérulents produisent des particules polluantes [10].

I.3. Effets sur la santé :

La profondeur de pénétration des particules dans l'arbre pulmonaire est directement liée à leurs dimensions, les plus grosses étant arrêtées puis éliminées au niveau du nez et des voies respiratoires supérieures. Le rôle des particules en suspension a été montré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les sujets sensibles (enfants, bronchitiques chroniques, asthmatiques...).

I.4. Effets sur l'environnement :

Les particules en suspension interviennent dans le cycle de l'eau, en particulier lors de la formation des nuages, des brouillards et des précipitations. Ces polluants peuvent influencer le climat en absorbant ou en diffusant le rayonnement solaire. Lorsqu'elles se déposent, les particules contribuent à la dégradation des bâtiments ; accumulées sur les feuilles des végétaux, elles peuvent entraver la photosynthèse.

- I) Les métaux lourds:** Les émissions de métaux toxiques proviennent principalement de la combustion de combustibles fossiles (charbons, fiouls...), de certains procédés industriels (sidérurgie, incinération de déchets ménagers ou industriels). Le plomb provient en particulier du trafic routier lors de l'utilisation de l'essence plombée.

I.5. Effets sur la santé :

I.6.

Les métaux s'accumulent dans l'organisme et provoquent des effets toxiques. Ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires...

Le plomb peut provoquer des troubles neurologiques, hématologiques et rénaux. Chez l'enfant, il peut entraîner des troubles du développement cérébral avec des perturbations psychologiques et des difficultés d'apprentissage scolaire

Le cadmium induit des lésions rénales pouvant évoluer vers une insuffisance rénales.

I.7. Effets sur l'environnement

Les métaux toxiques contaminent les sols et les aliments. Ils s'accumulent dans les organismes vivants et perturbent les équilibres et mécanismes biologiques

I.3.2.2) Les polluants secondaires : Ils ne sont pas directement émis dans l'atmosphère mais se forment lorsque les polluants primaires réagissent entre eux [2]. Les polluants secondaires englobent l'ozone troposphérique, le NO₂, Les

particules de sulfates et nitrates et ammonium issues respectivement du SO₂, du NO₂ et de NH₃ ainsi que des composés organiques lourds

A) L'ozone O₃ :

Il résulte de la recombinaison d'une molécule d'oxygène (O₂) avec un atome d'oxygène (O). Il est présent dans toute l'atmosphère à raison de quelques ppm (quelques molécules par millions de molécules des gaz constitutifs de l'air).

Ces concentrations ne restent néanmoins pas constantes dans toute son épaisseur.

Les niveaux les plus importants sont atteints dans la stratosphère. L'ozone forme une barrière protectrice contre le rayonnement U.V.

C'est pourquoi on parle d'ozone stratosphérique, par opposition à l'ozone troposphérique qui est le composé majeur de la pollution photochimique dans les basses couches de l'atmosphère.

L'ozone troposphérique est issu de réactions photochimiques (initiées par les rayonnements U.V. solaires) entre des composés appelés précurseurs, présents dans l'atmosphère. Les précurseurs sont les oxydes d'azote (NO_x) et les COV.

Les zones urbaines et péri-urbaines, lieux de rejets gazeux polluants automobiles et industriels, sont concernées par la pollution due à l'ozone troposphérique [11].

I.8. Effets sur la santé :

L'ozone est capable de pénétrer profondément dans les poumons, il provoque à forte concentration une inflammation et une hyperréactivité des bronches. Des irritations du nez et de la gorge surviennent généralement, accompagnées d'une gêne respiratoire.

Effet sur l'environnement :

Une exposition de quelques heures à des concentrations d'ozone supérieures à 80 mg/m³ suffit à provoquer l'apparition de nécroses sur les feuilles des plantes les plus sensibles.

Au niveau physiologique, l'ozone altère les mécanismes de la photosynthèse et de la respiration, et donc diminue l'assimilation carbonée de la plante. La productivité de certaines variétés d'espèces cultivées peut s'en trouver diminuée.

I.9.

I.4 Facteurs influençant la diffusion des polluants :

La qualité de l'air dépend fortement des conditions météorologiques. Pour une même quantité de rejets, celle-ci peut varier considérablement selon :

I.4.1 L'absence de vent : Favorise la concentration des polluants, alors que sa présence les disperse.

Toutefois, un vent fort pourra provoquer des retombées "en panache" et une pollution localisée, en fonction de la température, de la densité et de la vitesse d'éjection de l'effluent [12].

I.4.2 L'inversion des températures : l'inversion thermique a lieu lorsque le gradient adiabatique normal de la température est inversé. Quand un polluant se

déplace, la température est soumise à des pressions qui peuvent la faire monter ou descendre.

C'est ce gradient vertical de la température (diminution de la température de l'air de 0,7 °C pour 100 m d'ascension) qui permet aux polluants chauds de monter en altitude et d'être dilués dans de vastes volumes d'air.

En hiver, la température en altitude peut être plus élevée qu'au sol, suite au refroidissement du sol et de la basse couche de l'atmosphère au cours de la nuit.

En l'absence de vent, ce refroidissement ne monte pas forcément plus haut que quelques centaines de mètres, à un niveau où il existe encore de l'air plus chaud au-dessus. Le couvercle d'air chaud qui recouvre les villes, piège alors l'air vicié au-dessus de la cité. On dit que la convection thermique n'est plus réalisée et les polluants stagnent sous la couche d'inversion.

La chaleur du soleil, peut, deux heures après l'aube, briser cette inversion en réchauffant à nouveau le sol.

Ce phénomène est plus ou moins accentué selon la couverture du sol : nu, boisé, humide... et la présence ou non de brouillard [12].

I.4.3) La topographie

Le relief également un rôle important. L'air froid et la pollution s'écouleront toujours vers les vallées où par densité, cet air et la pollution environnante seront captifs. Sous l'influence du rayonnement solaire, des phénomènes de brise de pente, montante ou descendante et de brise de vallée, entraînant l'air de la vallée vers le plateau et inversement, peuvent être observés.

Les obstacles naturels ou les grandes constructions peuvent provoquer des tourbillons ou gêner la dispersion des polluants.

L'agglomération constitue également un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour. L'air chaud s'élevant, cela provoque une dépression qui va attirer l'air plus frais de la périphérie, entraînant du même coup les polluants qui peuvent s'y trouver [12].

I.4.4 Les phénomènes de brise : En été, et en l'absence de vent, on observe sur le littoral ou au bord des grands lacs, des phénomènes de brise de terre (le matin) et de brise de mer (l'après-midi). Dû aux différences de température, ce phénomène fait évacuer les polluants le matin et les fait revenir l'après-midi.

I.4.5 La pluie et les gouttelettes de brouillard : lesquelles solubilisent polluants gazeux et particules puis les entraînent vers le sol.

CHAPITRE II

La pollution par le dioxyde d'azote

II. La pollution par le dioxyde d'azote :

Introduction :

Le dioxyde d'azote NO₂ est une molécule composée d'un atome d'azote et de deux atomes d'oxygène (Figure n°02).

Il est généralement associé au monoxyde d'azote NO dans les mécanismes de pollution atmosphérique pour former la famille des oxydes d'azote NO_x.

C'est un oxydant qui intervient dans le processus de formation de l'ozone en basse altitude et qui réagit avec l'eau pour donner de l'acide nitrique.

C'est un gaz qui se trouve à l'extérieur comme dans les locaux, sa demi-vie dans les locaux et de 30 à 50 minutes [13].

II.1 Structure du NO₂

Le dioxyde d'azote est une molécule triangulaire avec structure mésomérique (figure N°2). Lorsqu'il dimérise, on obtient le gaz N₂O₄.

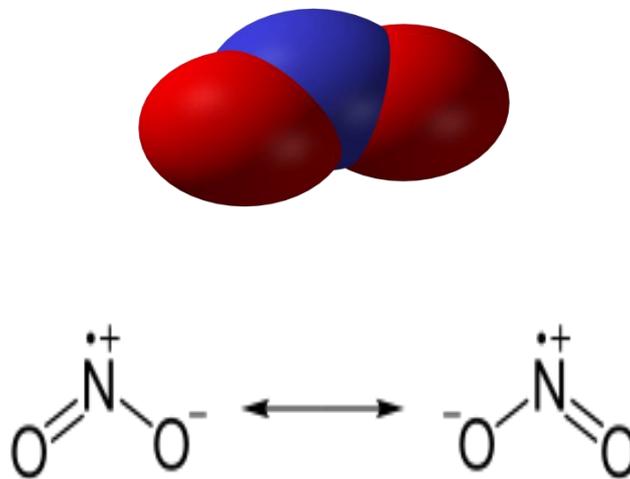


Figure n°02 : Structure du NO₂

II.2. Propriétés physico-chimiques

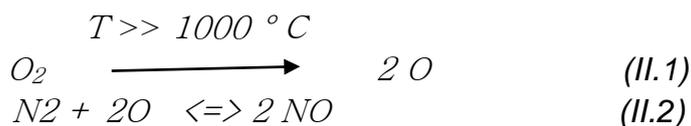
Le dioxyde d'azote NO₂ est un gaz brun rougeâtre très toxique suffocant et d'odeur âcre et piquante. Nous résumons en tableau n°02 ses propriétés physico-chimiques. Il est soluble dans l'eau et se dissocie facilement sous le rayonnement UV.

Tableau n°02 : Propriétés physico-chimiques du NO2 [13]

Formule brute	NO ₂ Isomère
Masse molaire	46 g/mol N: 30,45 %, O: 69,55 %,
Moment dipolaire	0,316 ± 0,010 D
Température de fusion	-11.2° C
Température d'ébullition	21.2° C
Solubilité	Dans l'eau
Masse volumique	1,45 g·cm ⁻³

II.3 Formation :

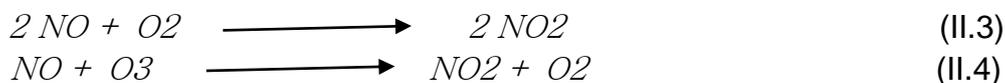
Le monoxyde d'azote NO se forme par réaction chimique entre l'azote N₂ et l'oxygène O₂ de l'atmosphère lors des combustions à haute température :



Ce polluant est émis par différentes sources, les plus courantes sont les installations de chauffage, les centrales thermiques, les usines d'incinération et les véhicules. Le NO peut se former d'origine naturelle lors de la foudre ou pendant les incendies.

Le NO formé à partir de l'air est appelé NO thermique, à ce NO thermique vient s'ajouter le NO combustible. Ce dernier provient de la réaction des radicaux d'oxygène avec l'azote contenu dans le combustible. Parmi ces deux, le NO thermique est le plus abondant [15].

Le monoxyde d'azote NO est rapidement oxydé en dioxyde d'azote NO₂ par réaction avec d'autres oxydants de l'air tels que l'O₂ ou l'ozone O₃:



La réaction II.4 est rapide et quantitative. Le NO consomme l'ozone et on dit que le NO est un piège de l'ozone.

Parmi les impacts majeurs de la présence du dioxyde d'azote dans l'air est la formation d'un autre polluant qui est l'ozone troposphérique [14].

Le mécanisme qui intervient dans la formation de l'ozone troposphérique est le suivant :

Etape 01 : Transformation du NO₂ :

Sous l'effet du rayonnement ultraviolet, le dioxyde d'azote est transformé en monoxyde d'azote et en oxygène :



Cette réaction est produite lorsque le soleil émet le plus d'énergie, c'est-à-dire, pendant les plus chaudes journées de l'année.

Etape 02 : Synthèse de l'ozone :

L'oxygène formé lors de la première étape réagit avec l'oxygène de l'air pour former l'ozone :



Etape 03 : Destruction de l'ozone :

Le monoxyde d'azote réagit avec l'ozone pour former le dioxyde d'azote selon la réaction II.4.

Ces réactions sont traduites par le cycle de Chapman que nous illustrons en figure 3 [9].

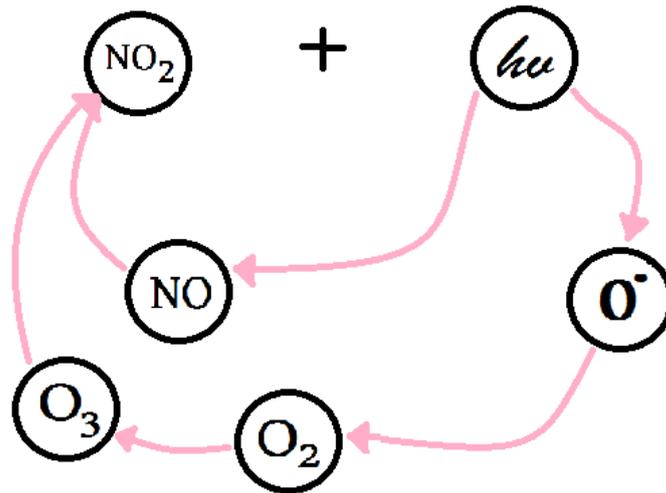


Figure n°03 : Cycle de Chapman [14]

Dans une atmosphère peu polluée, la réaction d'oxydation du NO en NO₂ est relativement rapide, avec comme résultat la diminution de l'ozone.

En milieu fortement pollué, l'oxydation du NO en NO₂ se poursuit dans l'atmosphère par l'action de l'oxygène, du rayonnement solaire et des COV comprenant des hydrocarbures des aldéhydes, des alcools etc...

Ce qui explique la grande concentration du NO₂ par rapport à la concentration des NO malgré les fortes émissions du monoxyde d'azote.

Le processus d'oxydation peut faire intervenir différentes réactions complexes, et la molécule clé qui régule le cycle est le radical OH, qui a une importance qualitative dans la production d'ozone [16].

Ceci se traduit par une compétition entre le NO₂ et les COV pour le OH, ce radical permet la décomposition des hydrocarbures et la régénération du NO en NO₂ selon le mécanisme suivant, [17].



Puis en un radical peroxyalkyl :



A cet instant, le peroxyalkyl est utilisé pour oxyder le NO en NO₂ et se transforme en alkoxy :



Les hydrocarbures sont donc décomposés une première fois pour la régénération du NO₂.

Ensuite, l'alkoxyl peut réagir directement avec l'O₂ par la réaction suivante :



Le HO₂ permet alors une nouvelle transformation de NO en NO₂ et la création d'un nouveau radical OH qui permettra de poursuivre la décomposition du même ou d'un autre hydrocarbure.



L'hydrocarbure RO peut également se décomposer en :



Et ainsi poursuivre sa décomposition en recommençant un nouveau cycle.

Si on s'intéresse aux NO_x, on remarque qu'ils jouent le rôle de catalyseur dans la production d'ozone.

En effet, ce n'est pas leur décomposition qui entretient le cycle de formation, mais leur concentration.

A la fin d'un cycle, le nombre de NO_x reste le même. Ils servent à produire l'O₃ de la manière suivante :



Le radical OH joue également le rôle de catalyseur. Ce radical très réactif permet l'oxydation des hydrocarbures et donc la formation de l'O₃.

Sa faible concentration peut varier énormément.

Dans une région fortement polluée les émissions de NO_x sont élevées, le radical OH se transforme en HNO₃, l'espèce réservoir pour OH et NO (moins d'O₃ créé). Par contre, dans une région où les émissions de NO_x sont faibles en présence d'hydrocarbures (zone rurale), ce sont les réactions de combinaisons des radicaux de type peroxy et HO₂ formant des acides organiques, des alcools ou des hydroperoxydes qui prennent le dessus (plus d'O₃ créé).

La concentration d'hydrocarbures par rapport à celle de NO_x est donc un facteur important pour la production d'O₃ [11].

Alors si on se trouve en milieu urbain, donc avec une forte concentration de NO_x, la production d'ozone est freinée d'une part par la production de HNO₃ due à la réaction entre OH et du NO₂ d'autre part, l'ozone présent sera détruit par la réaction (II.4) [12].

La figure 4 résume l'ensemble de ces réactions atmosphériques qui ont lieu en milieu pollué

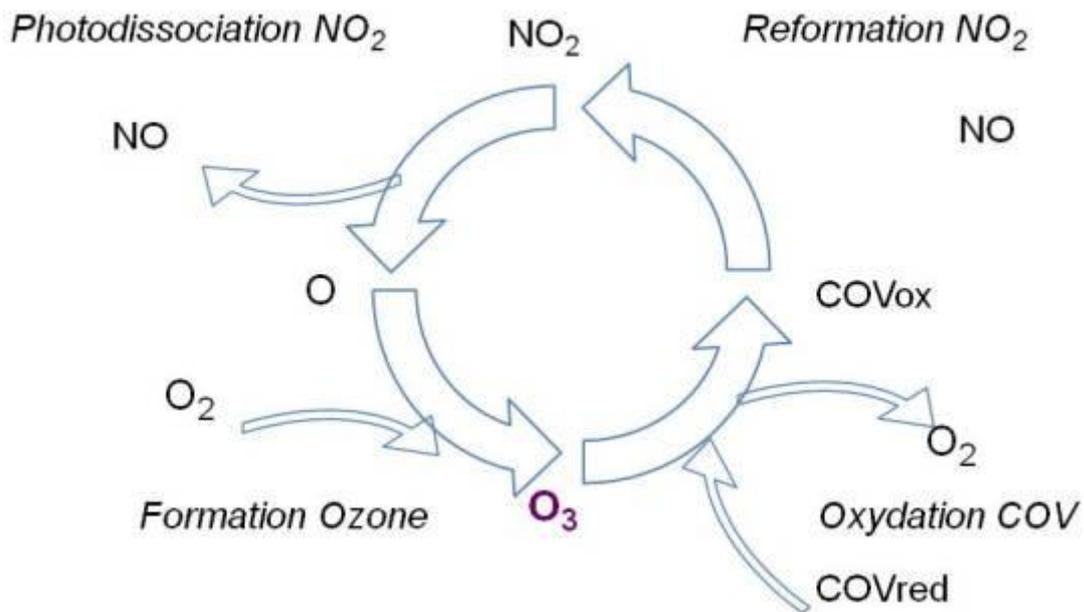


Figure n°04 : Schématisation de la production d'ozone en phase gazeuse [13]

II.4 Les sources du NO2

II.4.1 Sources anthropiques :

II.4.1.1 Le trafic routier :

Le secteur des transports est responsable de plus de la moitié des émissions totales de NO₂ dans l'atmosphère. En effet, celui-ci se forme lors de la combustion d'un carburant quelconque dans des conditions de pression et de température élevées, par réaction avec des composants de l'air que sont l'oxygène (O₂) et l'azote (N₂). Dans les véhicules à moteur à combustion « avions, automobiles, motos, camions et bateaux », on provoque l'inflammation du mélange air-carburant dans la chambre de combustion du moteur ce qui engendre des émissions de dioxyde d'azote cependant les quantités émises sont différentes selon le moteur et le carburant utilisés [13].

En Algérie les véhicules à moteur essence ne sont pas dotés d'un catalyseur, le taux des émissions de dioxyde d'azote est dans ce cas très élevé. Ces émissions augmentent fortement lorsqu'on roule à des vitesses très élevées.

Il est important de signaler qu'un véhicule à moteur diesel émet trois fois plus d'oxyde d'azote que les véhicules à moteur essence avec catalyseur.

Les gaz d'échappement contiennent 0.06 % de NO_x pour les moteurs essence et 0.04% pour les moteurs diesel dans le cas de véhicules non catalysés.

C'est pourquoi la réglementation dans les pays développés impose l'utilisation de pots catalytiques, les éléments de ce dernier déclenchent des réactions chimiques qui tendent à transformer les oxydes d'azote en gaz inerte N₂.

Pour la motrice essence, on utilise un catalyseur à trois voies qui utilise un support en céramique monothérique ou métallique stabilisé par des oxydes métalliques polyvalents tels que l'alumine et d'autres oxydes ainsi que des associations de métaux précieux tel que le platine, palladium et le rhodium.

Les catalyseurs à trois voies opèrent dans un système en boucle fermée comprenant une sonde lambda placée généralement sur le pot d'échappement, ou à oxygène, destinée à réguler le rapport air/ carburant.

Le catalyseur peut ainsi oxyder simultanément le CO et les HC en CO₂ et en eau tout en réduisant les NO_x en azote moléculaire.

Il y a lieu de signaler que le plomb contenu dans le carburant détruit le catalyseur en bloquant les pores, d'où la nécessité d'utiliser de l'essence sans plomb.

A chaud, le rendement est de plus de 90 % des polluants éliminés. La durée de vie d'un catalyseur est d'environ 100.000 Km.

II.4.1.2 Les émissions industrielles :

Dans les industries telles que les centrales électriques, les cimenteries, les incinérateurs, etc., les NO_x sont émis lors de la combustion des carburants fossiles, des éléments riches en carbone, essentiellement des hydrocarbures [17].

Ces industries produisent des NO_x et d'autres polluants et contribuent aux smogs photochimiques et à la production d'ozone troposphérique et de pluies brunes et de brouillards acides [18].

II.4.1.3 Le secteur résidentiel :

Les émissions anthropiques des dioxydes d'azote proviennent également des appareils à combustions domestiques à combustibles gazeux tel que les chauffages, les gazinières.

L'utilisation de combustibles fossiles dans tous ces appareillages accentue les émissions de polluants.

Les NO_x se retrouvent également parmi les nombreux constituants de la fumée de tabac [18].

II.4.2) Les sources naturelles :

Le dioxyde d'azote peut provenir de sources naturelles puisqu'il peut se former par combinaison de l'oxygène et de l'azote lors des orages, des éruptions volcaniques, les feux de forêt ainsi que par les activités bactériennes lors du cycle d'azote (figure 5).

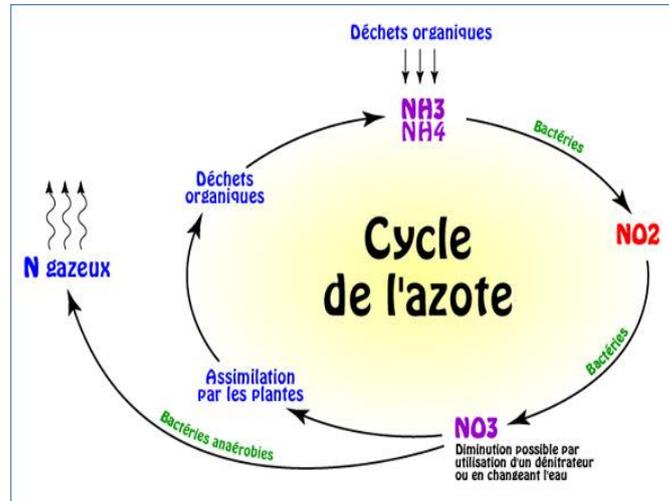


Figure n°05 : Cycle de l'azote

Cependant, les quantités de NO_x émises par les sources naturelles restent très faibles par rapport aux sources liées à l'activité humaine [19].

II.5 Effet sur la santé :

La pollution atmosphérique est néfaste et dangereuse pour la santé publique. Des études épidémiologiques sur les populations humaines indiquent que l'exposition à long terme aux NO₂ peut nuire à la santé, en effet ces derniers pénètrent profondément dans les plus fines bronches pulmonaires causant des irritations, des lésions ou bien des dommages irréversible des voies respiratoires.

Parmi les symptômes de brève exposition au NO₂, on compte les affections respiratoires favorisant les rhinopharyngites, les crises d'asthme ou les infections respiratoire comme les bronchites avec une forte sécrétion du mucus qui bouche les bronches, on observe également des pneumonies, dégradant la fonction pulmonaire (figure 6) [19].

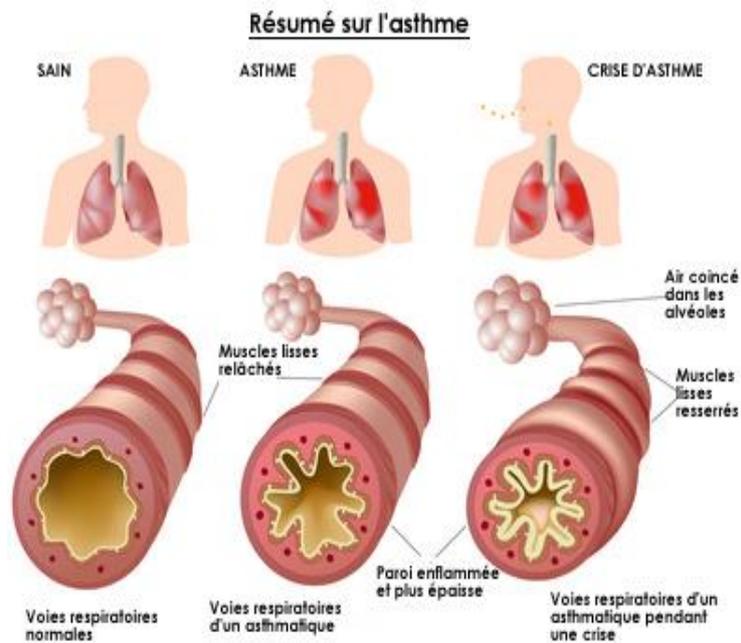


Figure n°06 : Asthme

Une forte exposition au dioxyde d'azote augmente le risque de cancer des poumons (figure 7) et peut entraîner une mort prématurée due à une maladie respiratoire ou cardiovasculaire.

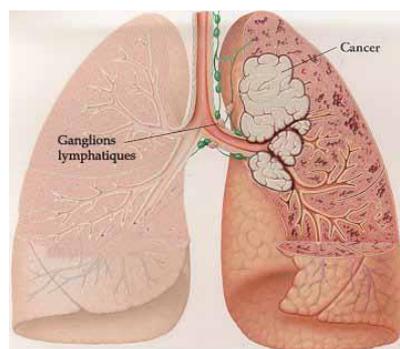


Figure n°07: Cancer du poumon

La pollution atmosphérique par les NO_2 est nocive pour toutes catégories de la population, mais les personnes âgées, les enfants et les fœtus sont les plus touchés, les risques d'infections des voies aériennes supérieures sont plus élevés chez les enfants en bas âges, car le développement des poumons et du système immunitaire n'est pas encore achevé à la naissance.

La pollution augmente le risque de crise d'asthme chez les asthmatiques et les personnes âgées ou celles souffrant d'une affection respiratoire chronique, le renforcement même minime de l'inflammation peut affaiblir les défenses immunitaires

déjà amoindries. Le système cardiovasculaire est également atteint car le manque d'oxygène engendre des infarctus et arythmies [19,20]

Parmi l'effet secondaire, on note les odeurs nauséabondes, irritation de la gorge et des yeux.

II.6 Effets sur l'environnement :

Le dioxyde d'azote est un puissant gaz à effet de serre, son pouvoir de réchauffement global sur 100 ans est 310 fois plus élevé que celui du CO₂ [21].

Il participe également à l'acidification des milieux naturels, en effet, le NO₂ se dissout dans l'eau et forme l'acide nitrique qui entre dans la composition des pluies acides. L'acidification des précipitations a des conséquences sur les végétaux, les champignons et d'autres organismes tels que les lichens.

Elle entraîne également l'acidification des sols en influençant leur fertilité cultivable et en augmentant la biodisponibilité de certaines substances toxiques dans le sol comme les métaux lourds. Les sols fortement acidifiés sont prédisposés à l'érosion.

L'acidité des lacs peut s'avérer grave aussi car elle empêche le développement normal des espèces et des végétaux qu'ils abritent. Les sols acidifiés empoisonnent les arbres, les affaiblissent et peuvent les tuer dans les cas graves.

La base de la chaîne alimentaire est également touchée, ainsi que tous les animaux qui en dépendent. Les oiseaux et mammifères aquatiques sont en particulier touchés [22].

II.6.1 Impact des pluies acides sur la flore :

Les pluies acides tuent les microorganismes, ce qui rend le sol sans éléments nutritifs produits, les feuilles végétales sont endommagées cela se traduit par des taches noires et marrons et ne peuvent plus pratiquer la photosynthèse.

Les forêts montagneuses, baignant dans le brouillard et les nuages, reçoivent encore plus d'acide que les forêts de plaine, ces formes de pollutions étant d'ailleurs assez souvent plus acides que les dépôts secs [23].

II.6.2 Impact des pluies acides sur les matériaux :

L'acidité des pluies peut accélérer l'érosion naturelle de nombreux matériaux, notamment calcaires, ainsi que la corrosion de certains métaux (le plomb qui tient les vitraux). Les pierres calcaires tendres, certains marbres et tuffeaux y sont les plus sensibles [24].

II.7 Normes et directives

Les valeurs guides actuelles de l'Organisation Mondiale de la Santé sont de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an, le seuil d'alerte est fixé à 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La détermination des valeurs limites du dioxyde d'azote en Algérie s'appuient sur les lignes directrices de l'OMS. Nous énumérons dans le tableau qui suit les valeurs guides de l'OMS ainsi que les valeurs fixées par l'union européennes et l'Algérie :

Tableau n°03 : les Valeurs guides de l'OMS et normes algériennes et EU du NO2.

Valeurs guides de l'OMS		
Pollution de fond	Pollution de pointe	Références
<p><u>Objectif de qualité:</u> 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne sur l'année civile</p>	<p><u>Valeur limite pour la protection de la santé:</u> 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 fois par an <u>Seuil d'information et de recommandation:</u> 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire <u>Seuil d'alerte :</u> 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire ou 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ si la procédure d'information et de recommandation à été déclenchée la veille et le jour même et que les prévisions font craindre un nouveau risque de déclenchement pour le lendemain <u>Valeur limites pour la protection de la santé humaine :</u> Moyenne horaire : 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an Moyenne annuelle : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Moyenne journalière : 150$\mu\text{g}/\text{m}^3$ <u>Valeurs limites pour la protection de la végétation</u> 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle pour la somme des NO et des NO2</p>	[25]
	Normes UE	
Pollution de fond	Pollution de pointe	Références

40 µg/m ³ moyenne sur l'année civile	Seuil de recommandation et d'information : En moyenne horaire : 200 µg/m³. Seuil d'alerte : En moyenne horaire : 400 µg/m ³ dépassé sur 3 heures consécutives. 200 µg/m ³ si dépassement de ce seuil la veille, et risque de dépassement de ce seuil le lendemain	[25]
	Normes Algérienne	
Pollution de fond	Pollution de pointe	Références
40 µg/m ³ moyenne sur l'année	Moyenne journalière : 160µg/m ³	[25]

II.7.1 les seuils d'information et recommandations : Correspondent à un niveau de concentration de NO₂ dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population, enfants , personnes âgées et femmes enceinte et qui rend nécessaires la diffusion d'informations immédiates et adaptés à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.

II.7.2 les seuils d'alerte : Correspondent à un niveau de concentration de NO₂ dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou de dégradation de l'environnement justifiant la prise de mesures d'urgence.

II.7.3 Valeur limite: Un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement [26]

CHAPITRE III

THECHNIQUES DE PRELEVEMENT ET D'ANALYSE DU NO₂

III.1 Technique de prélèvement du NO₂ :

III.1.1 Méthode de Griess-Saltzman: Prélèvement dynamique et absorption des NO_x

Le prélèvement se fait en phase aqueuse de colorimétrie, cette méthode nécessite un piégeage des NO_x par **barbotage** de l'air à analyser.

Le temps d'échantillonnage est très important entre 30 minutes et plusieurs heures, alors que pour les techniques par chimiluminescence, le temps d'échantillonnage dure quelques secondes [27].

L'air à analyser barbote dans une solution d'acide sulfanilique, N (1-naphthyl)- éthylènediamine dihydrochloride et acide acétique, appelée réactif de Saltzman, permettant la dissolution du NO₂.

Le réactif de Saltzman contient une amine qui forme un complexe coloré en présence du NO₂. Par oxydation du NO en NO₂ sur de l'oxyde de chrome (CrO₃), il est possible de connaître la concentration de NO.

Cette méthode n'est pas adaptée pour la mesure des oxydes d'azote en atmosphère peu polluée, car il faut pouvoir détecter des concentrations bien inférieures au ppm. La coloration rose-violette obtenue est proportionnelle aux quantités de NO et de NO₂ échantillonnées. La mesure de la concentration se fait par lecture de densité optique par spectrométrie à 550 nm [28].

III.1.2 Prélèvement passif

L'échantillonnage passif est basé sur le transfert de matière d'une zone à une autre sans mouvement actif de l'air.

Le contact de l'air à analyser avec un milieu de captage est dans ce cas induit par convection naturelle et diffusion.

Les polluants diffusent de manière passive à travers une colonne d'air ou une membrane poreuse, puis ils sont piégés par un adsorbant.

Les durées d'exposition des échantillonneurs passifs sont plus longues que celles des échantillonneurs actifs : de 8 h à 2 semaines.

Leur utilisation ne nécessite pas de dispositif électrique de pompage et leur mise en œuvre est très facile.

Le paramètre principal du tube passif est sa vitesse de diffusion (ou débit) de prélèvement, qui représente la quantité de matière adsorbée en fonction du temps. Les échantillonneurs utilisés pour le prélèvement des dioxydes d'azote sont des tubes radiaux.

III.1.2.1 Les échantillonneurs Radiello :

Pour le prélèvement des NO_x, les échantillonneurs utilisés sont de type « Radiello » et sont commercialisés par la Fondazione Salvatore Maugeri.

L'échantillonneur est composé d'une cartouche adsorbante placée dans un corps poreux cylindrique à géométrie radiale en polypropylène, appelé corps diffusif.

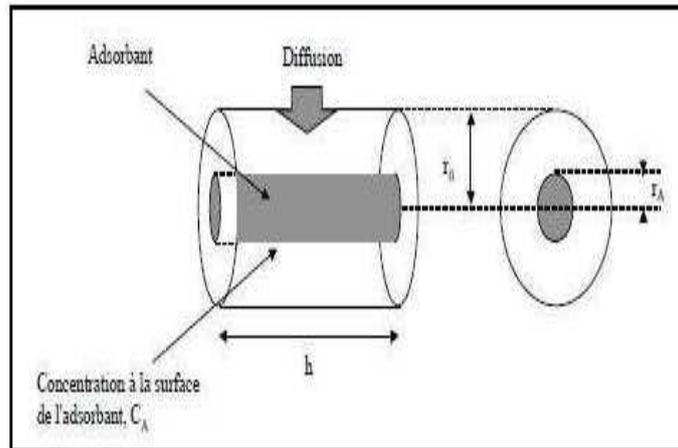


Figure n°08 : Echantillonneur radial

III.1.2.2 Principe des tubes à diffusion :

Le principe général de l'échantillonneur passif consiste en un capteur contenant un adsorbant ou un absorbant (support solide imprégné de réactif chimique) adapté au piégeage spécifique d'un polluant gazeux. Dans notre cas, le NO₂ est piégé par adsorption sur un filtre imprégné de triéthanolamine notée TEA.

Le polluant gazeux est transporté par diffusion moléculaire à travers la colonne d'air formée par le tube jusqu'à la zone de piégeage où il est retenu et accumulé sous la forme d'un produit d'adsorption.

L'air est transporté dans l'échantillonneur par diffusion moléculaire selon la loi de Fick jusqu'à l'adsorbant [26].

la première surface est appelée diffusive et la deuxième adsorbante (Respectivement **S** et **A** en figure 9)[27].

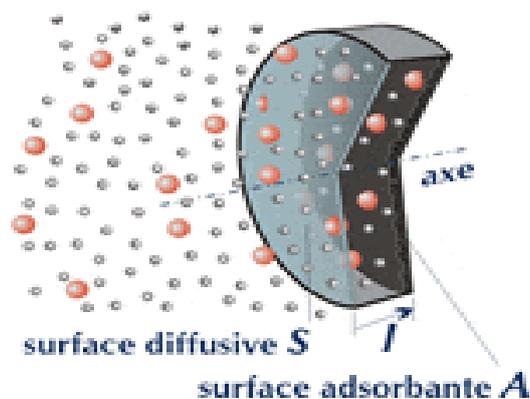


Figure n°09 : Schématisation de la diffusion moléculaire

Sous un gradient de concentration, les molécules adsorbables (couleur) pénètrent la surface diffusive et seront piégées par celle adsorbante.

Sous le gradient de concentration dc/dl , les molécules gazeuses traversent **S** en diffusant vers A, le long du parcours diffusif qui est parallèle à l'axe de la boîte. Celles adsorbables sont piégées par **A** suivant la loi de la diffusion

$$\frac{dm}{dt} = DS \frac{dc}{dl} \quad (\text{III.5})$$

Où dm est la masse piégée pendant le temps dt et D est le coefficient de diffusion. Si C est la concentration à la surface diffusive et C_0 est celle à la surface adsorbante, l'intégrale de (III.5) est :

$$\frac{m}{t} = D \frac{S}{l} (C - C_0) \quad (\text{III.6})$$

Qui donne : $\frac{m}{tC} = D \frac{S}{l} = Q \quad (\text{III.7})$ ou $C = \frac{m}{tQ} \quad (\text{III.8})$

Si la concentration à la surface adsorbante est égale ou très proche de 0, Q est le débit de piégeage, dont les dimensions sont justement celles d'un flux (m en μg , t en minutes et C en $\mu\text{g.l}^{-1}$, les dimensions de Q sont l.min^{-1}).

Donc, si Q est constant et connu, on peut connaître la concentration environnementale par la mesure de la masse piégée et du temps d'exposition.

Afin d'améliorer la sensibilité analytique il faudrait augmenter m : cela peut se faire en augmentant Q .

D étant une constante, on ne peut atteindre la cible qu'en agissant auprès du rapport S/l , qui est la **constante géométrique** de l'échantillonneur.

Néanmoins, si on élargit S , dans l'usuel échantillonneur axial on ne peut pas éviter d'élargir A aussi, car il faut que les deux surfaces diffusives et adsorbantes se fassent face à distance constante.

N'ayant qu'une seule façon de récupérer l'analyte piégé par l'échantillonneur axial – le déplacement par solvant tout élargissement de A entraîne une augmentation proportionnelle du volume du solvant désorbant, de sorte que la dilution annule tout effet de l'augmentation de Q .

On pourrait réduire l mais, au-dessous d'une valeur critique (à peu près 0,8 mm), la loi de la diffusion n'est plus respectée si la vitesse de l'air est faible, la vitesse de piégeage devenant plus importante que celle de ravitaillement de nouvelles molécules à la surface diffusive.

Alors on peut augmenter Q si on change la géométrie de l'échantillonneur d'axiale en **radiale**.

C'est comme ça que le tube Radiello est beaucoup utilisé ces dernières années. C'est sa paroi cylindrique qui fonctionne à barrage diffusif: les molécules diffusent le long du rayon vers un adsorbant cylindrique lui-même et coaxial à la surface diffusive.

Pour un même diamètre du cylindre, S devient beaucoup plus grande que celle de l'échantillonneur axial, sans aucune augmentation de la masse d'adsorbant: bien que la surface adsorbante soit beaucoup plus petite que celle diffusive, la distance entre les deux est toujours constante.

Étant donné que $S=2\pi rh$ (h est la hauteur du cylindre) et que le parcours diffusif est le rayon, on doit écrire dans la forme :

$$\frac{dm}{dt} = D2\pi hr \frac{dc}{dr} \quad (\text{III.9})$$

L'intégrale de (III.9) du rayon de la surface diffusante r_d à celui de la surface adsorbante r_a devient :

$$\frac{m}{tC} = D \frac{2\pi hr}{\ln \frac{r_d}{r_a}} = Q \quad (\text{III.10})$$

Le terme :

$$\frac{2\pi h}{\ln \frac{r_d}{r_a}} \quad (\text{III.11})$$

Est la constante géométrique de **radiello**.

Donc, le débit est fonction directe de la longueur du cylindre diffusif et inverse du logarithme du rapport entre le rayon du cylindre diffusif et celui du cylindre adsorbant.

Alors qu'on peut mesurer par mètre la valeur de r_a , celle de r_d ne peut qu'être estimée par des mesures d'exposition. En effet, afin de n'agrandir pas trop **radiello** et de respecter en plein la loi de la diffusion, le barrage diffusif a été projeté sous forme d'un tube dont la paroi est épaisse et micro-poreuse: la longueur réelle du parcours diffusif n'est pas la différence entre les rayons extérieurs des tubes diffusif et adsorbant mais est beaucoup plus longue à cause de la tortuosité du parcours entre les pores. Un cylindre diffusif de 8 mm de rayon extérieur, 1,7 mm d'épaisseur et 25 μm de porosité, couplé avec une cartouche adsorbante de 2,9 mm de rayon, ne forme pas un parcours diffusant de $8-2,9=5,1$ mm mais bien de 18 mm [27,28] .

III.2 Méthodes d'analyse du dioxyde d'azote :

III.2.1 Méthode spectrométrique

La spectrophotométrie UV/Visible repose sur l'interaction du rayonnement électromagnétique et de la matière dans le domaine s'étendant de 200 à 800 nm. L'absorbance des composés dans le proche UV et le visible est exploitée en analyse quantitative par application de la loi de Beer-Lambert.

La méthode s'applique non seulement aux composés qui présentent une absorption dans le visible mais également aux composés dont un dérivé obtenu par une réaction chimique présente une telle absorption.

L'absorption dans le domaine UV / visible est due au passage d'un niveau électronique à un autre d'énergie supérieure avec changement des niveaux de vibration et de rotation ; au cours de ce processus, un électron passe d'une orbitale moléculaire à une autre d'énergie supérieure [29].

III.2.2 Méthode chromatographique

La chromatographie ionique est une méthode spécifique des ions en présence contrairement à la méthode colorimétrique qui détermine l'absorbance d'une solution colorée.

C'est une technique séparative et d'analyse d'espèces ioniques inorganiques ou organiques dans des mélanges complexes en solution.

Elle est fondée sur les propriétés des résines échangeuses d'ions qui permettent une fixation sélective des anions ou des cations présents dans une solution.

Sur la résine échangeuse d'ions conditionnée sous forme d'une colonne chromatographique, circule en permanence un éluant. Une très faible quantité de la solution à analyser (25 à 50 μ l) est injectée et les ions sont fixés sélectivement sur la colonne chromatographique. L'éluant circulant en permanence sur la colonne, les ions sont ensuite progressivement « décrochés » en fonction de leur taille, leur charge et leur degré d'hydratation. Chaque espèce ionique est ainsi séparée et détectée par conductimétrie et/ou par mesure d'absorbance à la sortie de la colonne. La concentration de l'espèce ionique dans la solution est directement proportionnelle à la conductivité ou à l'absorbance [30].

III.2.3 La chimiluminescence

La chimiluminescence est la technique la plus employée pour le suivi en continu des oxydes d'azote. C'est le phénomène par lequel certaines molécules portées à un état excité par une réaction chimique retournent à l'état fondamental en restituant une partie de l'énergie sous forme d'émission de lumière.

Ce principe se prête bien à la mesure des teneurs atmosphériques en NO_x [30].

On considère un échantillon à analyser contenant, entre autres, une certaine quantité de monoxyde d'azote et une autre de dioxyde d'azote. On sépare l'échantillon en deux parties homogènes et de même volume

La réaction se fait en deux étapes :

- **Mesure des NO :**

Le premier volume est envoyé dans une chambre à réaction où il est mélangé à de l'ozone présent en excès.

L'ozone intervenant dans la réaction et doit d'abord être généré par oxydation de l'oxygène de l'air ambiant.

La réaction entre le NO et l'ozone est la suivante :



Le dioxyde d'azote excité NO_2^* retombe à un état fondamental stable (NO_2) en émettant un rayonnement lumineux de longueur d'onde comprise entre 600 et 1200 nm [29]

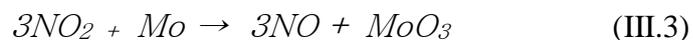
Le rayonnement produit est mesuré par un **photomultiplicateur**, passant par un **filtre optique** sélectif pour les longueurs d'onde supérieures à 610 nm, le rayonnement lumineux est converti par un rayonnement **électrique** mesurable.

On en déduit la concentration $[NO]$ de l'échantillon initial.

- **Mesure du NO_2 :**

Le second volume est envoyé dans un four convertisseur de **molybdène** chauffé à haute température (320 °C).

La réaction est la suivante :



Le NO_2 est alors réduits en NO. Ce volume ne contenant plus que le NO est envoyé dans une autre chambre de réaction où il est mélangé à l'ozone en excès.

Le rayonnement émis est maintenant proportionnel à la quantité totale d'oxydes d'azote.

La concentration en $[NO_2]$ est déterminée par soustraction :

$$[NO_2] = [NO_x] - [NO]. \quad (III.4)$$

De manière plus générale, une réaction de chimiluminescence impliquera toujours les trois étapes suivantes :

- Une réaction préliminaire de formation d'un composé intermédiaire (par exemple NO_2)

- Excitation de ce composé intermédiaire par transformation de l'énergie chimique de l'étape précédente en énergie électronique (par exemple NO_2^*)
- Emission de lumière par le composé intermédiaire passant de l'état énergétique excité à un état énergétique inférieur.

Cette méthode convient assez bien pour mesurer des concentrations assez faibles, allant du ppb à quelques ppm en volume [31]. Elle est par ailleurs très spécifique.

CHAPITRE IV
MÉTHODOLOGIE EXPERIMENTALE

IV. Méthodologie :

Ce chapitre est consacré à la description de la méthodologie de travail et à la présentation des différents sites pour l'évaluation du taux de pollution de l'air par le NO₂ sur le grand Alger.

IV.1 Présentation des tubes Radiello

L'échantillonneur Radiello (figure 10) est composé d'une cartouche adsorbante, d'un corps diffusif, d'une plaque, d'un support et d'une étiquette adhésive. On peut réutiliser tous les composants sauf la cartouche adsorbante [31].



Figure n°10 : Echantillonneur Radiello

IV.1.1 La cartouche adsorbante

La cartouche adsorbante (figure 11) a une longueur de 60 mm et un diamètre de 4,8 mm. La cartouche code 166 est spécifique pour le NO₂ [31].



Figure n°11 : La cartouche adsorbante.

IV.1.2 Le corps diffusif :

Pour le prélèvement le corps diffusif du NO₂ est de 16 mm de diamètre et 60 mm de hauteur (figure 12).

Le **corps bleu, code 120-1** utilisé pour le NO₂ est en polyéthylène microporeux.

L'épaisseur de sa paroi est de 1,7 mm et la porosité de 25±5 µm.

La longueur du parcours diffusif est de 18 mm. Il est opaque à la lumière et est employé pour piéger les composés photosensibles [31].



Figure n°12 : Le corps diffusif

IV.1.3 La plaque de support :

La plaque de support, **code 121**, est en polycarbonate et fonctionne soit à bouchon soit à soutien du corps diffusif. Elle a un filetage qui sert à y visser le corps diffusif, un clip pour son accrochage et une poche adhésive transparente à y introduire l'étiquette code barre.

Il faut assembler les trois parties avant de l'employer.

IV.2 Préparation des tubes passifs :

Il faut assembler correctement les différentes parties du tube passif, avant d'entamer le prélèvement.

Les étapes de préparation des tubes sont les suivantes :

- Introduire la cartouche dans le corps diffusif.
La base du corps diffusif est munie d'un siège à centrer la cartouche.
- Visser le corps diffusif à la plaque de support.
- Coller l'étiquette avec la date et l'horaire, puis on expose le tube radiello.
- Une fois le temps de prélèvement épuisé, on note la date et l'horaire et on récupère la cartouche dans son tube.

IV.3 Choix et description des sites de prélèvement :

En fonction de l'objectif fixé et après enquête sur le terrain et étude des travaux antérieurs sur le thème et en fonction des moyens disponibles, nous avons orienté notre travail sur l'étude de la pollution de l'air par le dioxyde d'azote à Alger en prenant en considération les trois types de sites. :

- **Sites de proximité automobile appelés aussi « station trafic ».**
Ces sites permettent de fournir des informations sur les concentrations mesurées dans des zones représentatives du niveau maximum d'exposition auquel la population située à proximité d'une infrastructure routière est susceptible d'être exposée [30].

- **Sites urbains de fond** qui donnent le suivi de l'exposition moyenne de la population au dioxyde d'azote dit de « fond » dans les centres urbains. Situés loin des sources de NOx et donc à au moins 50 m des routes à grande circulation [30].
- **Sites semi-urbains** : Ce genre de site est à choisir en dehors ou à la limite de l'agglomération, on les appelle aussi sites péri-urbains Ils doivent être représentatifs de la banlieue qui est moins polluée mais qui est susceptible de recevoir les polluants par transport du panache urbain en dehors de la ville.

Les tubes installés à environ 3 m de hauteur pour éviter d'éventuels actes de vandalisme.

Nous avons sélectionné 19 sites sur Alger pour nos campagnes de prélèvement (S1, S2.....,S19) qui tiennent compte aussi bien de l'intensité des émissions en polluants et de leur transport que de leur impact sanitaire.

IV.3.1 Critères de sélection des sites :

Le repérage des sites sélectionnés sur la ville d'Alger a constitué la seconde étape de notre partie expérimentale.

Il s'agit d'une phase déterminante car elle conditionne la qualité des mesures.

Il faut savoir en effet que le positionnement des tubes doit répondre à des critères stricts afin d'optimiser l'information contenue dans la mesure [32].

- Aucun obstacle ne doit empêcher la diffusion des polluants en créant des turbulences autour du tube.
- Le site doit être suffisamment aéré pour éviter les phénomènes d'accumulation des polluants autour du tube.
- Les tubes dits de fond doivent être placés à une distance minimum de 50 mètres de toute source de pollution.
- Les sites trafic doivent se situer à une distance maximum de 5 mètres d'une infrastructure routière [32].

IV.3.2 Présentation des sites sélectionnés: Situation géographique et classification

Les sites retenus sont répartis sur 19 communes de l'agglomération d'Alger. L'objectif est de cerner l'impact du trafic automobile et des activités industrielles sur la qualité de l'air dans le centre et le Sud-Est et l'Est d'Alger.

Les sites retenus appartiennent aux catégories suivantes:

- **13 Sites urbains:** S1 , S2 , S3 , S4.1 , S5 , S7, S8 , S10 , S13 , S14 , S15 , S16 et S18

- **5 Sites "station trafic" :** S4.2 , S9 , S11 , S17 et S19
- **2 Sites semi-urbains:** S6 et S12.

Le tableau 7 résume les caractéristiques du site ainsi que les densités des populations des communes de la wilaya choisies [33].

Tableau n°05 : Situation géographique et classification des zones d'études

Sites	Localisation	Type de site	Densité de la population (hab/Km2)
S1	Ministère des Ressources en Eau Kouba	Urbain Très bonne ventilation naturelle. Site sur les hauteurs d'Alger qui est exposé aux émissions de la RN5	10525,27
S2	Parc d'El H Station Samasafia	Urbain Très bonne ventilation naturelle moyenne	29623,9
S3	Reghaia	Urbain Ventilation naturelle moyenne	1067,99
S4.1	Bab el Oued près du front de mer El Kettani	Urbain Très forte ventilation naturelle	87557,03
S4.2	Bab el Oued (Boulevard Mohamed Ouanouri)	Station trafic Rue type canyon	87557,03
S5	El Mouradia	Urbain Bonne ventilation naturelle	14751,67
S6	Birtouta	Semi-Urbain Bonne ventilation naturelle	872,32

S7	l'Ecole nationale polytechnique d'Alger El Harrach	Urbain Ventilation naturelle moyenne	5351,85
S8	l'Office National de la Météorologie Dar el Beida	Urbain Bonne ventilation naturelle	1316,26
S9	Rue Didouche Mourad	Station trafic Rue de type canyon	24082,17
S10	l'hôpital CHU Mustapha Pacha d'Alger	Urbain Ventilation naturelle moyenne	24082,17
S11	La Provale KOUBA	Station trafic	10525,27
S12	CDER "BOUZEREAH"	Semi-urbain Très bonne ventilation Naturelle. Point le plus élevé de l'Alger	45227,3
S13	l'hôpital de Rouiba	Urbain Ventilation naturelle moyenne	2771,15
S14	Cité Sorecal Bab Ezzouar	Urbain Ventilation naturelle moyenne	11519,58
S15	Cité Sonatiba Gué de Constantine	Urbain Ventilation naturelle moyenne	5515,29

S16	Cité Ben Omar Kouba	Urbain Ventilation naturelle moyenne	10525,27
S17	Hassen Badi Belfort el Harrach	Station trafic	5351,85
S18	Belcourt	Urbain Ventilation naturelle moyenne	14427,61
S19	Salembier El Madania	Station trafic	25701,84

La zone d'étude comprend au total de 2 364 230 habitants et s'étend sur une superficie de 363 km².

La figure n°13, illustre la localisation des sites de mesure sur la carte d'Alger.



Figure n° 13: Localisation des différents sites de prélèvement du NO2 à Alger

Nous présentons quelques photos des sites de mesure :



Figure n°14. S1 : Site de prélèvement au Ministère des Ressources en Eau Kouba.



Figure n°15. S2 : Site de prélèvement au parc d'el hamma.



Figure n°16. S3 : Site de prélèvement Reghaia



Figure n°17 : S4.1 : Poste de prélèvement à Bab el Oued.



Figure n°18 : S4.2 : Site de prélèvement à Bab el oued



Figure n°19: S7 : Poste de prélèvement à l'école nationale polytechnique d'Alger



Figure n° 20 : S8 : Poste de prélèvement à l'Office National de la Météorologie.



Figure n°21 : S10: Poste de prélèvement à l'hôpital CHU Mustapha Pacha d'Alger



Figure n°22 : S12 : Poste de prélèvement au Centre De Développement Des Energies Renouvelables Cder “ Bouzaréah”
S12 au CDER, Bouzaréah:
Le tube passif est placé sur le support d'un appareil installé sur une terrasse avec une vue sur le littoral ouest d'Alger. Ce site qui est très bien ventilé n'est pas exposé aux émissions du trafic routier.



Figure n°23 : S17 : Poste de prélèvement à Hassen Badi Belfort el Harrach

IV.4 Organisation des campagnes de mesures :

La campagne de mesure s'est déroulée du 05 mai au 04 juin 2014.

Elle s'est décomposée en deux séries d'une semaine, la première série s'étalant du 05 au 12 mai et la seconde série du 28 mai au 04 juin.

- Campagne n°1 : Du 05/05/2014 au 12/05/2014.
- Campagne n°2 : Du 28/05/2014 au 04/06/2014.

IV.5 Désorption et analyse des échantillons :

Pour la récupération des échantillons des NO₂ piégés par les cartouches adsorbantes, nous avons fait une extraction à l'eau distillée.

Cette solution d'absorption est mélangée aux réactifs.

Les désorbats seront analysés par spectrométrie UV visible à 537nm

IV.5.1 Dosage des nitrites :

a) Réactifs utilisés :

-sulfanilamide de marque PURISS.P.A

- *NEDA*: N-(1-naftyl) ethylendiammine dichlorhydrate de marque Biochem.

- nitrite de sodium(NaNO₂)

b) Préparation des réactifs :

- Dissoudre 10 g de sulfanilamide en 100 ml de HCl concentré et diluer-la à 1000 ml avec l'eau

- Dissoudre 250 mg de N-(1-naftyl) ethylendiammine dichlorhydrate en 250 ml d'eau

- Préparer une solution de nitrite de sodium à concentrations comprises entre 0,1 et 15 mg·l⁻¹

-Mettre les réactifs dans des flacons bruns et les conserver à 4°C à l'abri de la lumière.

IV.5.2 Analyse des échantillons :

L'analyse des échantillons se fait comme suit :

- Verser 5 ml d'eau distillée dans l'éprouvette contenant la cartouche adsorbante. Agitation pendant deux minutes (solution A)
- Prélever 0.5ml de la solution A et la mélanger à 6ml de réactifs.
- Analyser la solution obtenue par spectrométrie UV visible à 537nm.
- Tirer la concentration du NO₂ en µg/ml à partir de la courbe d'étalonnage.

IV.6 Calcul des teneurs atmosphériques :

Le débit de piégeage pour $Q= 298$ à $T= 298$ K et $P= 1013$ hPa est $0,141\text{ng}\cdot\text{ppb}\cdot\text{1}\cdot\text{min}^{-1}$. [34]

La concentration C_{NO_2} en ppb est calculée par:

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{m_{\text{NO}_2}}{Q \cdot T}$$

Où m_{NO_2} est la masse de nitrite en ng repérée dans la cartouche.

t est le temps d'exposition en minutes.

Q est la valeur du débit d'échantillonnage. [34]

Les teneurs obtenues en ppb peuvent être transformé en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

RESULTATS ET DISCUSSION

V.1 Résultats des deux séries de mesure :

Après analyse des échantillons par spectrophotométrie UV, nous avons quantifié la pollution de l'air par le NO₂ dans les différents sites de la capitale.

Les résultats des calculs des concentrations du NO₂ en ppb sont résumés dans le tableau n° 6.

1^{ère} campagne : du 05/05/2014 au 12/05/2014

2^{ème} campagne : du 28/05/2014 au 04/06/2014

Tableau n°06 : Teneurs atmosphériques du NO₂ en (ppb) des différents sites des deux campagnes de mesure

Sites	C _{NO2} (ppb)	C _{NO2} (ppb)
	Campagne n°01	Campagne n°02
S1	29,55	9,70
S2	3,79	9,28
S3	15,19	8,44
S4	3,58	25,75
S5	3,37	13,93
S6	3,67	0,21
S7	6,33	3,79
S8	27,44	18,99
S9	17,73	8,86
S10	0,21	11,82
S11	14,35	12,66
S12	0,04	0,04
S13	7,59	19,41
S14	3,58	6,33
S15	36,30	16,04
S16	3,63	3,58
S17	13,93	8,86

S18	16,88	14,35
S19	32,08	18,99

Les résultats du tableau ci-dessus montre que pour la majorité des sites étudiés, les teneurs atmosphérique en dioxydes d'azote varient d'un site à un autre, et pour le même site de la première campagne de mesure à la deuxième.

Les valeurs sont comprises entre 0.04 ppb et 36 ppb.

Les sources de pollution naturelle ou anthropique telles que le trafic routier ou les émissions industrielles sont à l'origine de ces variations.

Les conditions météorologiques représentent également un facteur important dans les variations des teneurs atmosphériques en polluants.

Les variations des teneurs atmosphériques en NO₂ dans les 19 sites étudiés pour chaque campagne sont illustrées dans les figures n°24 et n°25.

La figure 26 illustre les moyennes des teneurs observées sur les deux campagnes de mesure.

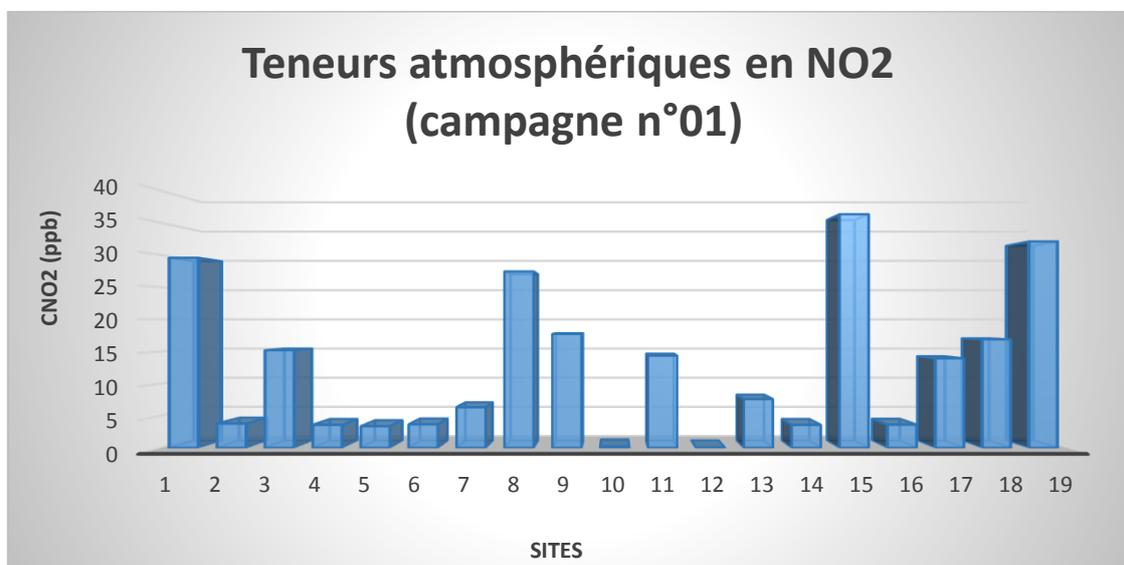


Figure n°24 : Variation des teneurs atmosphériques en NO₂ (Campagne n°1)

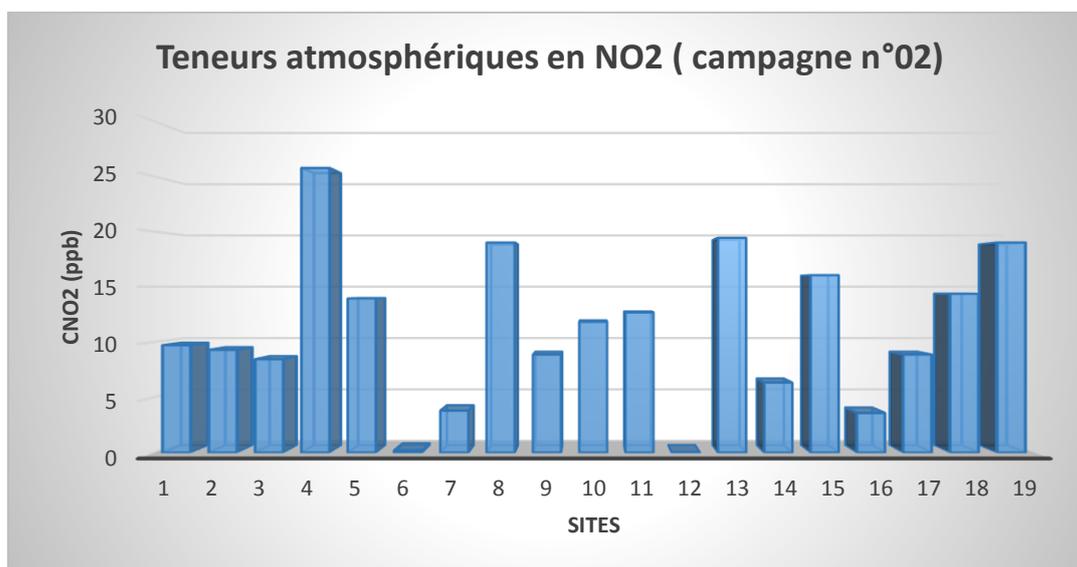


Figure n°25: Variation des teneurs atmosphériques en NO2 (Campagne n°2)

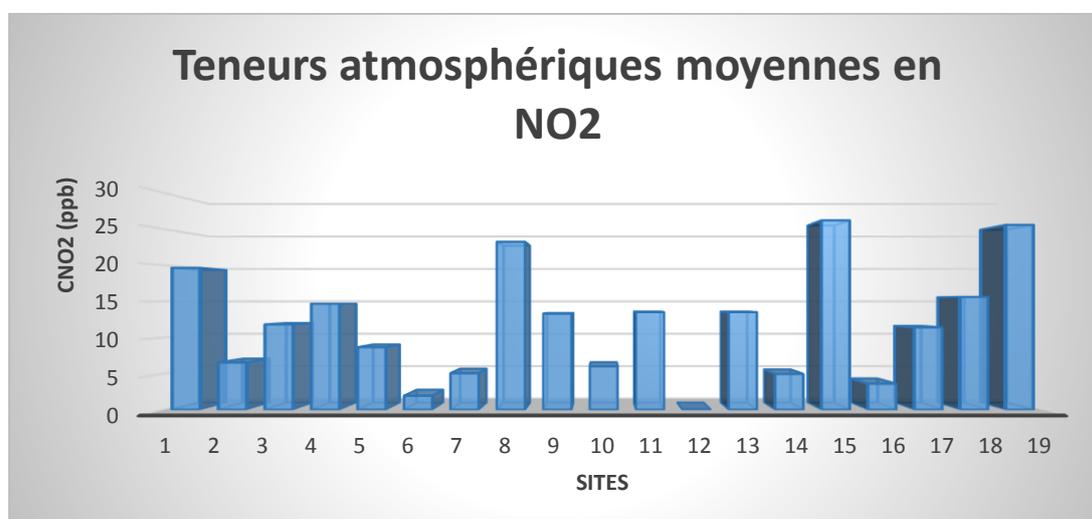


Figure n°26 : Variation des teneurs atmosphériques moyennes en NO2

Pour interpréter les résultats obtenus, il est primordial d'analyser les facteurs météorologiques de la ville d'Alger du mois de mai et d'étudier dans ce qui suit l'impact de ces derniers sur le taux d'émissions du dioxyde d'azote.

V.1.1 Analyse des données météorologiques de la ville d'Alger :

Il est important d'intégrer à notre interprétation, des données météorologiques (température, pluviométrie, humidité, vitesse et direction des vents) afin de comparer les conditions opératoires des deux séries de mesure.

Les résultats fournis par le Centre Climatologique National (CCN) d'Algérie sont les suivants : [35]

Tableau n°7 : Données météorologiques de la campagne de mesure n°01 [35]

Jours	T Max (°C)	T Min (°C)	T Moy (°C)	Précipitations	Vitesse du vent max (m/s)	Vitesse du vent Moy (m/s)	Humidité Moy en %	Direction du vent (°)	Ciel prédominant
05/05/2014	23	5.7	14.5	0	10	9	72.8	30	Ensoleillé
06/05/2014	24	6.5	15.4	0	8	8	74.3	20	Ensoleillé
07/05/2014	22.7	11	16.9	0	8	8	84.9	340	Ensoleillé
08/05/2014	23.8	15.6	19.7	0	9	8	81.1	30	ensoleillé
09/05/2014	26.1	14.6	20.4	0	9	9	78.1	40	Ensoleillé
10/05/2014	26.8	11.7	19.2	0	6	6	74	340	ensoleillé
11/05/2014	27	12.5	19.8	0	9	9	83.1	340	ensoleillé
12/05/2014	27.1	14.5	20.8	0	7	6	79.5	300	Ensoleillé

Tableau n°8 : Données météorologiques de la campagne de mesure n°02[35]

Jours	T Max (°C)	T Mini (°C)	T Moy (°c)	Cumul Pluviométrique (mm)	Vitesse du Vent Max (m/s)	Vitesse du vent Moyenne (m/s)	Humidité %	Direction du vent (°)	Ciel Prédominant
28/05/2014	18	8.9	13.4	1.3	16	14	81.1	70	Nuageux /Précipitation
29/05/2014	21	6.4	13.7	0	14	12	72	30	nuageux

30/05/2014	19	8.8	13.9	1.9	18	15	81.3	80	Nuageu x/ précipita tion
31/05/2014	25.2	11.1	18.1	0	11	9	74	40	Dégagé
01/06/2014	22	16	19	0	13	12	72.5	30	Dégagé
02/06/2014	24	15	19.5	0	11	10	73	30	dégagé
03/06/2014	26	14	20	0	9	8	72	40	Ensoleill é
04/06/2014	30	16	23	0	8	8	71	30	Ensoleill é

Le mois de mai 2014 a été surtout caractérisé, au début, par la prédominance d'un temps chaud et ensoleillé sur la majeure partie des régions nord.

A partir de la deuxième quinzaine et vers la fin du mois, une succession de perturbations pluvio-orageuses se sont développées sur notre capitale et ont donné lieu à de violentes averses de pluie parfois de grêle et ont été à l'origine d'intempéries [35].

On remarque que la température a baissé entre la première et la deuxième série. Bien que la solubilité du NO₂ soit faible, la pluviométrie peut constituer un puits de ce polluant.

Son suivi est donc nécessaire pour pouvoir interpréter les éventuelles différences observées d'une campagne à l'autre.

L'interprétation des résultats doit aussi s'appuyer sur la vitesse et la direction du vent, paramètres essentiels notamment au niveau de la dispersion du polluant NO₂.

V.1.2 Discussion des résultats obtenus pour les sites urbains :

Tableau n°9 : Résultats des teneurs atmosphériques en NO₂ des sites urbains

Sites	C _{NO2} (ppb)	Sites	C _{NO2} (ppb)
S1	29,55	S1	9,70
S2	3,79	S2	9,28
S3	15,19	S3	8,44
S4.1	3,58		
S5	3,37	S5	13,93
S7	6,33	S7	3,79
S8	27,44	S8	18,99

S10	0,21	S12	0,04
S13	7,59	S13	19,41
S14	3,58	S14	6,33
S15	36,30	S15	16,04
S16	3,63	S16	3,58
S18	16,88	S18	14,35

On remarque que pour la majorité des sites urbains étudiés, les teneurs en NO₂ diminuent de la première semaine de mesure à la deuxième semaine.

Pour la première semaine de mesure (05/05/2014 au 12/05/2014), les sites (S1, S3, S8, S15, S18) présentent des teneurs importantes en dioxyde d'azote allant de 15 à 36 ppb, ces taux d'émissions élevés sont dus d'une part, aux facteurs météorologiques, en effet, cette période a été caractérisée par la prédominance d'un temps chaud (Tmax : 27°C) et ensoleillé sur la majeure partie des régions nord.

D'autre part, la proximité des zones industrielles joue un rôle important en particulier dans les sites comme le «Ministère Des Eaux » qui se trouve dans les hauteurs de la commune de Kouba, recevant d'importantes quantités de gaz émis par les industries qui s'étalent sur la moutonnière d'Alger.

De même pour le S15 « cité Sonatiba » qui reçoit d'importants polluants émis par les zones industrielles de la commune de Baraki et Sidi Moussa.

Enfin, la proximité des stations trafic, traduit les teneurs élevées obtenues, en particulier pour le S8 de l'OMN, ce dernier se trouve au cœur d'une intersection d'axes routiers à grande circulation.

Les résultats obtenus de la 2^{ème} campagne de mesure (28/05/2014 au 04/06/2014) affirment ceux obtenus lors de la 1^{ère} campagne.

La baisse de température, l'aération accentuée par le vent ainsi que les précipitations qui ont prédominé cette période sont à l'origine des faibles teneurs en dioxyde d'azote enregistrées.

En effet, ces intempéries ont favorisé la dispersion des polluants sous l'effet du vent dont la vitesse max enregistrée est de 18 m/s.

En revanche, de faibles teneurs en NO₂ ont été obtenues pour les sites urbains (S7 : Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, S10 : CHU Mustapha, S16 : Quartier résidentiel à Ben Omar Kouba)

Ces sites sont assez isolés du secteur industriel ainsi que du trafic routier. Malgré la forte densité du parc automobile pour le site S4.1 « Bab El Oued », une faible teneur obtenue interprétée par la dispersion des polluants sous l'effet du vent accentuée par la proximité du front de mer d'EL KITANI.

On constate que les teneurs mesurées aux sites S2, S5, S13 et 14 sont légèrement plus élevées que celles mesurées durant la première campagne, cela est dû probablement à une plus forte intensité des activités humaine et/ou des émissions du trafic routier

Les figures n°27 et n°28 illustrent les teneurs observées sur les deux campagnes de mesure pour les sites urbains.

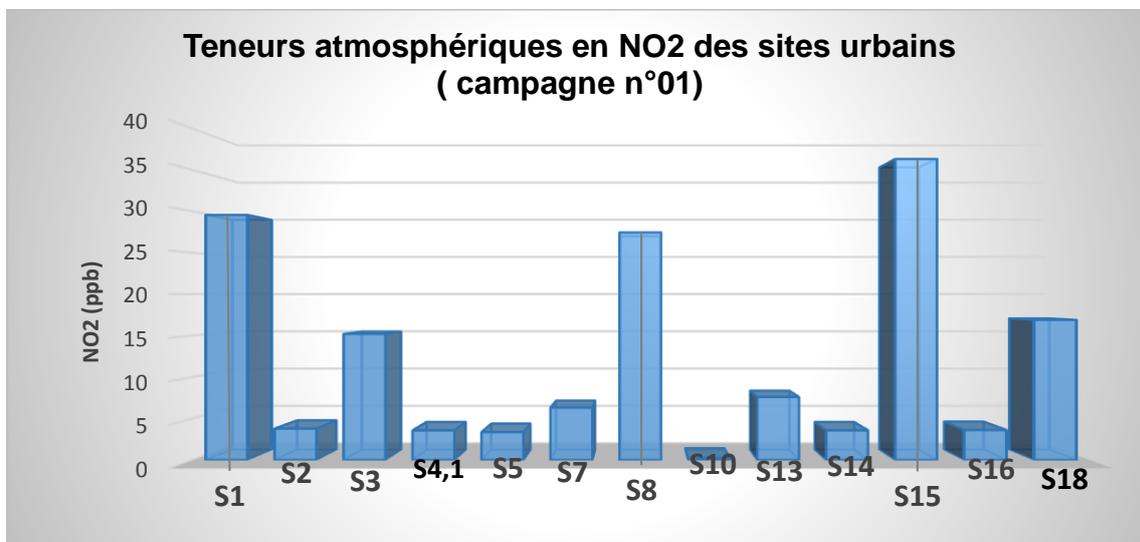


Figure n°27 : Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les sites urbains (campagne n°01)

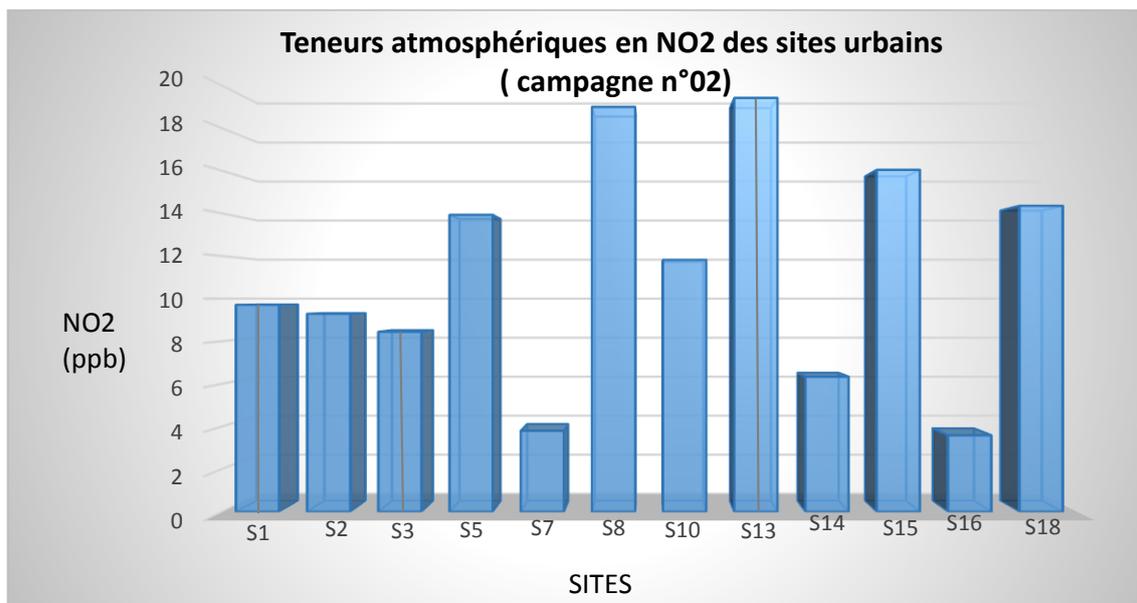


Figure n°28 : Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les sites urbains (campagne n°02)

V.1.3 Discussion des résultats obtenus pour les sites de fond « semi-urbains » :

Tableau n°10: Résultats des teneurs atmosphériques en NO₂ des sites semi urbains pour les deux campagnes de mesure

Sites	C _{NO₂} (ppb)	C _{NO₂} (ppb)
S6	3,67	0,21
S12	0,04	0,04

On remarque que pour la majorité des sites semi-urbains étudiés, les teneurs en NO₂ diminuent de la première semaine de mesure à la deuxième semaine.

Les teneurs atmosphériques en NO₂ pour les sites semi urbains sont très faibles et varient de (0.04 ppb à 3.6 ppb), en particulier pour le site S12 (CDER) qui se trouve dans les hauteurs de la commune de Bouzereah, loin des sources de pollution industrielles et à une distance de plus de 80 m des axes routiers.

Le résultat obtenu est conforme aux constatations faites lors d'études antérieures portant sur la pollution par les BTEX et PM₁₀. (Thèse : Evaluation de la pollution atmosphérique : Etude des particules fines en site urbain à Alger) BELHOUT Dalila 2011)

De très faibles teneurs sont également enregistrées pour le site S6, le poste de prélèvement de cette dernière a été implanté dans une maison dans la banlieue d'Alger (Birtouta) loin des sources de pollution.

Ces sites de fond sont caractérisés par une bonne ventilation naturelle qui permet la dispersion des polluants.

La petite variation des teneurs atmosphérique en NO₂ de la première campagne à la 2^{ème} est due aux conditions météorologiques, principalement les précipitations enregistrées durant la deuxième semaine de prélèvement.

Les figures n°29, n°30 et n°31 illustrent les teneurs observées sur les deux campagnes de mesure pour les sites semi-urbains.

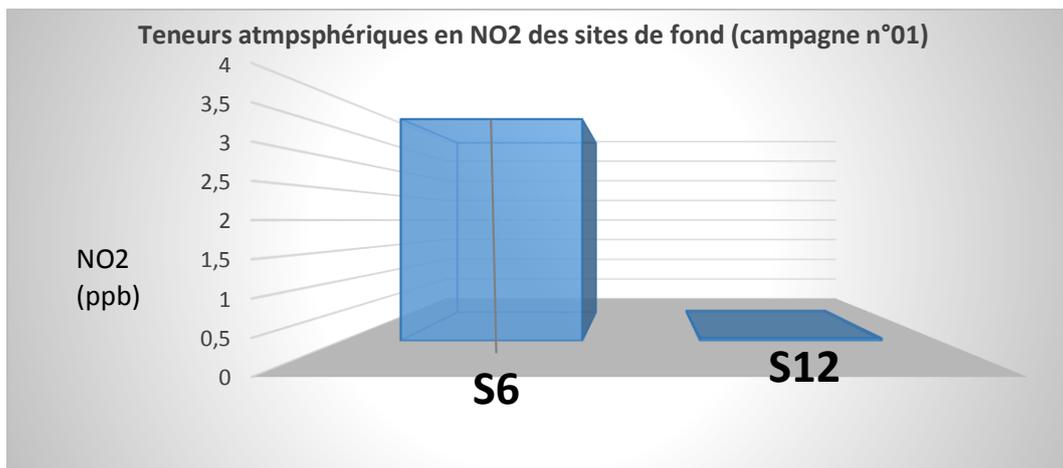


Figure n°29: Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les sites semi-urbains (campagne n°01)

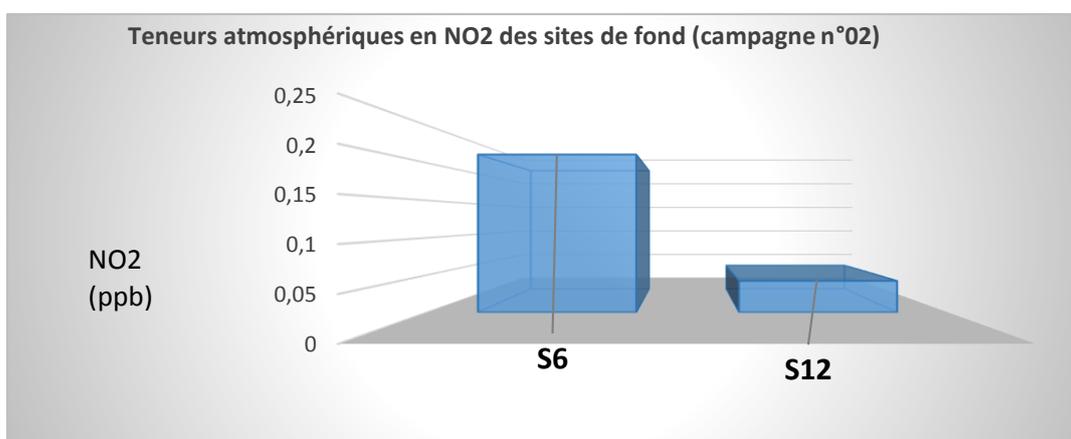


Figure n°30 : Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les sites semi-urbains (campagne n°02)

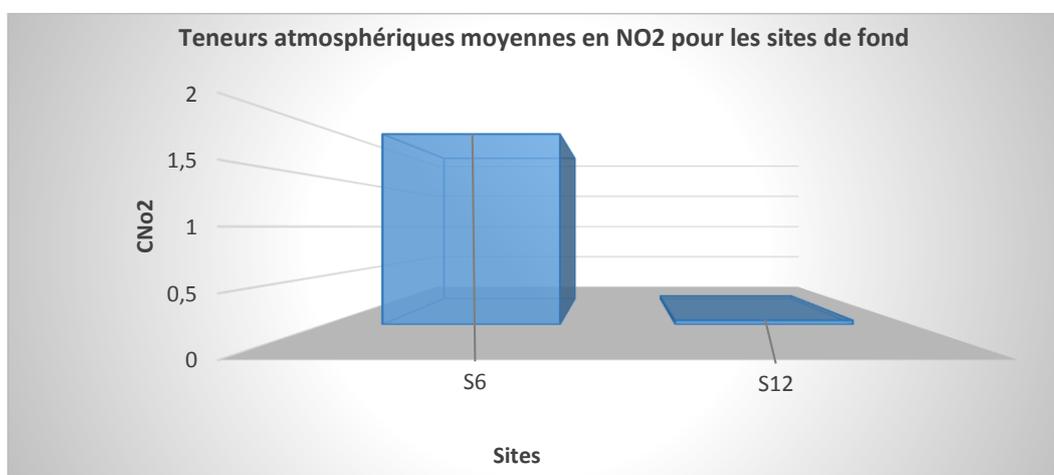


Figure n°31 : Variation des teneurs atmosphériques moyennes en NO2 pour les sites semi-urbains

V.1.4 Discussion des résultats obtenus pour les stations trafic :

Tableau n°11 : Résultats des teneurs atmosphériques des sites de trafic routier (Campagne n°01)

Sites	C _{NO2} (ppb)
S9	17,73
S11	14,35
S17	13,93
S19	32,08

L'impact du trafic automobile sur les teneurs en dioxyde d'azote est très net, les teneurs observées en situation de proximité automobile sont environ trois à quatre fois supérieures à celles mesurées dans les sites semi urbains (tout en restant inférieures à la valeur réglementaire).

On constate plus particulièrement un site remarquable. Il s'agit du point « S19 » (El Madania) dont le poste de prélèvement se trouve à 1 m d'un axe routier à grande circulation, ainsi que du point « S4.2 » (Boulevard Mouhamed Ouanouni de Bab el oued) avec des teneurs en NO₂ très élevées, cette rue est de type canyon, l'axe routier est situé entre deux grands immeubles, favorisant la concentration des dioxydes d'azote émis par le moteur des véhicules.

La variation des teneurs atmosphérique en NO₂ d'une semaine à une autre des sites (S9, S11, S17, S19) est due aux conditions météorologiques, principalement les précipitations enregistrées durant la deuxième semaine de prélèvement.

Tableau n°12 : Résultats des teneurs atmosphériques en NO₂ des sites de trafic routier (campagne n°02)

Sites	C _{NO2} (ppb)
S4.2	25,75
S9	8,86
S11	12,66
S17	8,86

S19	18,99

Les figures n°32, n°33 et n°34 illustrent les teneurs observées sur les deux campagnes de mesure pour les sites de trafic routier.

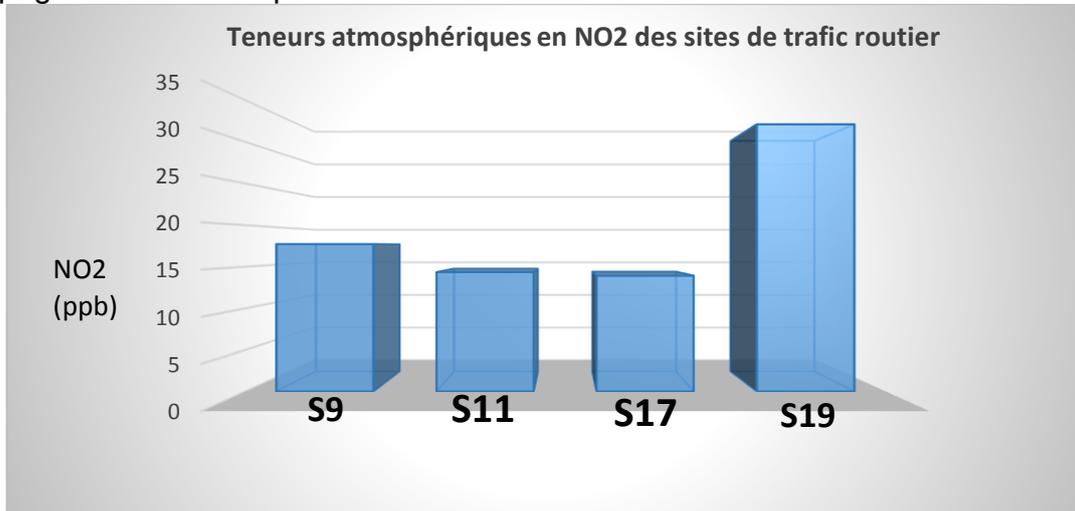


Figure n°32 : Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les stations trafic (Campagne n°01)

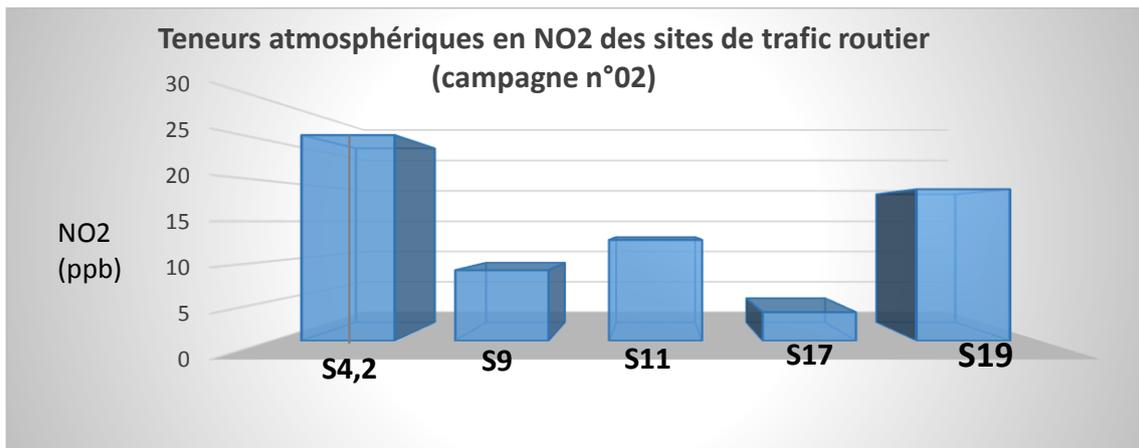


Figure n°33: Variation des teneurs atmosphériques en NO2 pour les stations trafic (Campagne n°02)

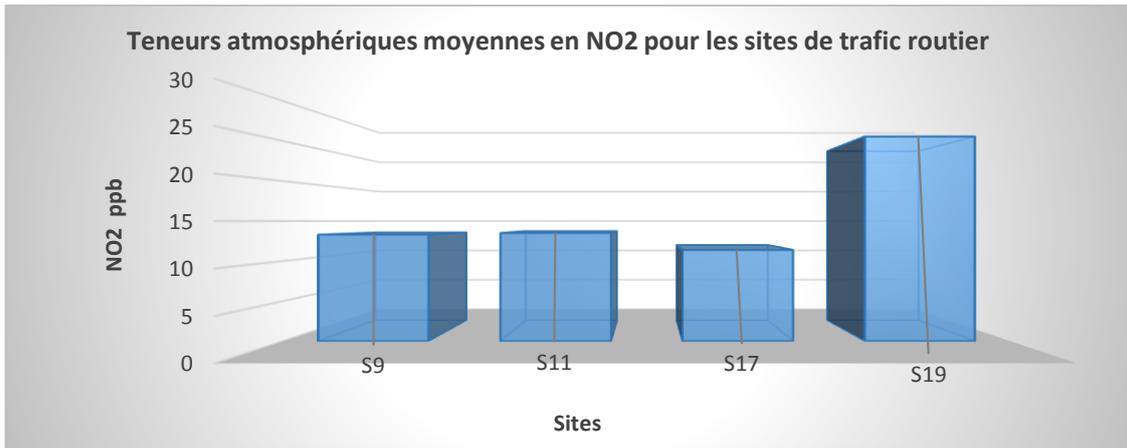


Figure n°34 : Variation des teneurs atmosphériques moyennes en NO2 pour les stations trafic routier

La figure n°35 illustre les teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites pour la première campagne :

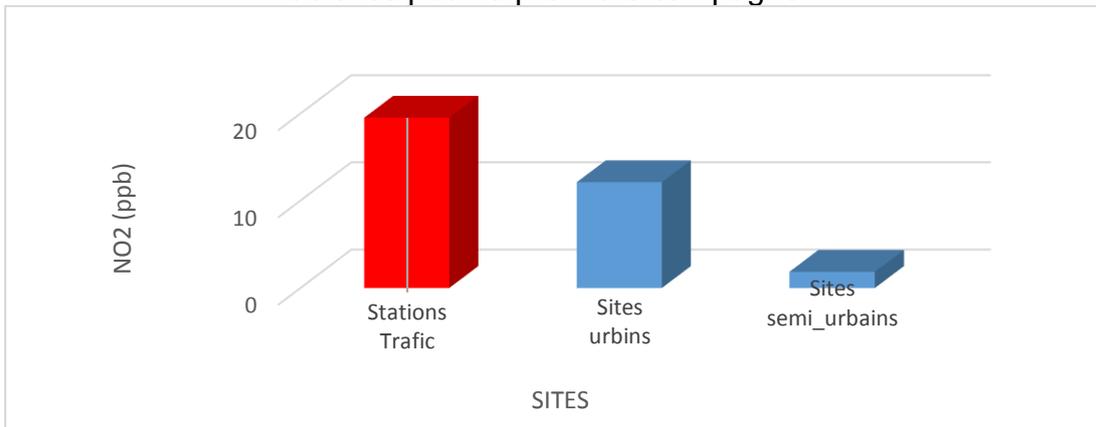


Figure n°35 : Teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites (campagne n°01)

La figure n°36 illustre les teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites pour la deuxième campagne :

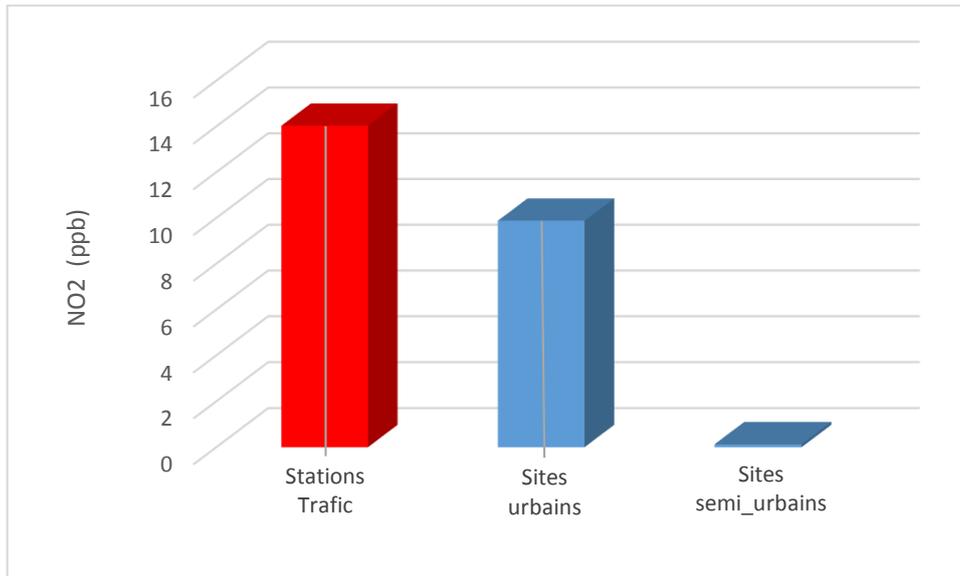


Figure n°36 : Teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites (campagne n°02)

La figure n°37 illustre les teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites pour les deux campagnes de mesure



Figure n°37 : Teneurs atmosphériques moyennes en NO2 des trois types de sites pour les deux campagnes

V.2 Comparaison des résultats obtenus aux normes :

La figure n°38 illustre une comparaison des teneurs moyennes mesurées aux différents sites par rapport à la norme de l’OMS.

Les niveaux enregistrés ne sont pas représentatifs de la moyenne journalière. Les comparaisons entre les présents résultats et la valeur limite journalière ne sont effectuées qu’à titre indicatif.

Pour cette comparaison, l’unité en ppb des teneurs moyennes a été transformée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

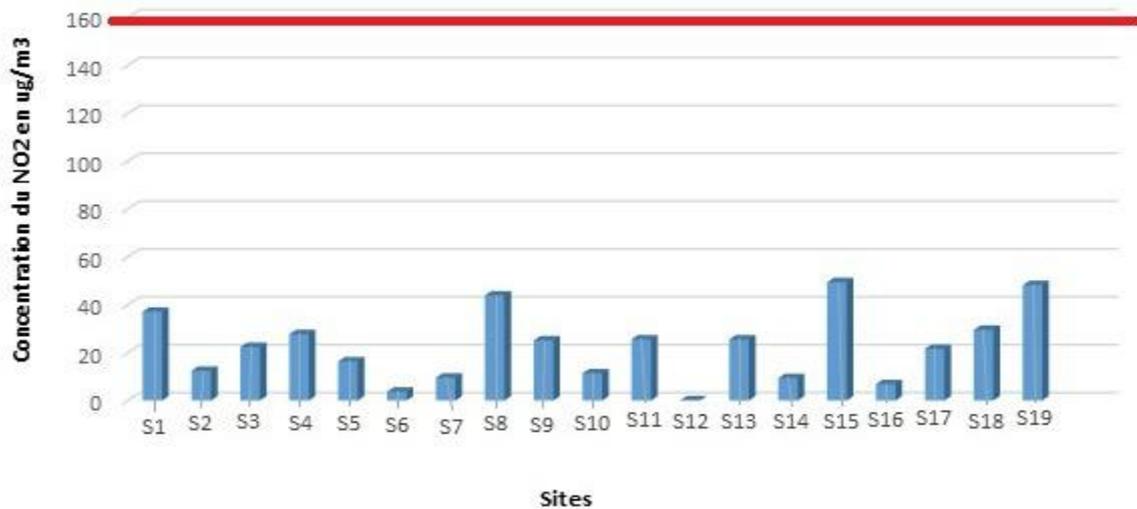


Figure n°38 : Comparaison des teneurs atmosphériques moyennes en NO2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec la norme de l’OMS

Malgré les fortes teneurs en NO2 évaluées dans les sites de proximité telle que la valeur maximale du site S15 qui est de ($68.57\mu\text{g}/\text{m}^3$), on constate qu’aucun site n’a dépassé la valeur limite journalière.

On peut dire qu’à Alger et durant la période étudiée, la pollution par le NO2 reste à un niveau acceptable.

Il faut toutefois signaler que les teneurs observées ne correspondent pas à une période d’intense activité photochimique.

En période où on a les conditions de formation de la pollution photochimique, les teneurs en NO2 augmentent considérablement surtout en milieu urbain et semi urbain.

V.3 Comparaison des teneurs atmosphériques en NO2 avec d'autres résultats :

V.3. 1 Comparaison avec des données de la localité d'Alger :

Des mesures du NO2 ont été faites par le réseau de la surveillance de la qualité de l'air à Alger (SAMASAFIA) dans les années 2002, 2003, 2004 et 2006 au niveau de quatre sites : Ben Aknoun, Bab Elouad, 1er mai et Hamma

Les données de Samasafia sont données en moyenne mensuelle, durant la période des mois de mai et juin, alors la comparaison est faite à titre indicatif comme l'indique le tableau suivant :

Tableau n°13 : Teneurs en NO2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mesurées par le réseau Samasafia [36].

Années	2002	2003	2004	2006
Ben Aknoun NO2($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	39	50	29	52
1^{er} Mai NO2($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	37	20	49	60
Bab El Oued NO2($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40	07	32	18
Hamma NO2($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	42	06	-	-
Moyenne NO2($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	39.5	20.75	36.66	43.33

En 2006 Samasafia mesurait $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le site urbain de Ben aknoun et nous mesurons actuellement plus de $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le S15 de Gué de Constantine. Pour les sites de proximité de trafic routier, Samasafia mesurait $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et nous mesurons actuellement plus de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces résultats reflètent l'augmentation du nombre de véhicule qui circule dans la wilaya et l'accentuation de l'impact des secteurs industriels sur la qualité de l'air de la ville d'Alger.

V.3.2. Comparaison des teneurs mesurées avec des résultats d'autres pays :

Le Tableau n°16 permet de situer la pollution atmosphérique de la ville d'Alger par le NO2 par apport à d'autres pays.

Tableau n°14: Teneurs de NO2 mesurées dans certains pays. [37] [38] [39].

Villes	Concentration moyenne en NO2	Sources
32 locations dans le monde entier	20,4-103,3 µg/m3	[41]
Londres UK	33.6 pbb	[41]
Toronto canada	25.2 pbb	[41]
Toronto canada	25.2 pbb	[41]
Atlanta USA	45.9 pbb	[41]
7 cités en Australie et la nouvelle Zélande	7.0-11.7 pbb	[41]
7 communautés en japon	7.0-31.3 ppb	[41]
Pays-Bas	12-58 µg/m3	[41]
Munich (Allemagne)	19-67 µg/m3	[41]
Suède	6-46.7 µg/m3	[41]
12 communautés en sud Californie USA	4-39 ppb	[41]
Bangkok	44 µg/m3	[42]
Colombo	37 µg/m3	[42]
Hongkong	50 µg/m3	[42]
Jakarta	72 µg/m3	[42]
Bombay	18 µg/m3	[42]
New Delhi	33 µg/m3	[42]
Seoul	68 µg/m3	[42]
Shanghai	58 µg/m3	[42]

Singapour	27 µg/m ³	[42]
Paris- (de fond)	21 µg/m ³	[43]
(de proximité)	50 µg/m ³	

On remarque que les plus fortes teneurs en NO₂ sont enregistrées au niveau d'agglomérations se trouvant dans des pays en voie de développement.

Les pays développés tels que les USA, Paris ou le Canada, enregistrent de faibles teneurs en polluants. Ceci est probablement dû au fait qu'en Europe et aux Etats Unis, la plupart des véhicules qui circulent sont équipés de catalyseurs qui réduisent considérablement les émissions polluantes.

CONCLUSION

CONCLUSION:

Notre étude avait pour objectif d'évaluer la pollution atmosphérique par le NO₂ sur différentes communes de la ville d'Alger.

Les échantillonneurs Radiello utilisés pour le prélèvement passif nous ont permis de bien quantifier le taux de dioxyde d'azote dans les sites différents :

13 sites urbains, 5 sites station trafic et 2 sites semi-urbains

Après analyse des échantillons par spectrométrie UV, les densités optiques obtenues nous ont permis de calculer les concentrations du polluant. Ces résultats nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

-Les teneurs en dioxyde d'azote dans l'air ambiant mesurées varient selon le type de site.

-Les teneurs les plus importantes mesurées proviennent des sites voisins de grands axes routier dits ainsi que du secteur industriel (48 µg/m³ au niveau du Boulevard Mohamed Ouanouri °et 68 µg/m³ au niveau de Gué de Constantine).

-Le parc automobile prend de l'ampleur sur la ville d'Alger durant ces dernières années, le taux de polluants augmente fortement d'année en année.

-Notre capitale risque de toucher la valeur limite si des mesures ne sont pas prises

Dans l'optique de diminuer les taux d'émissions il faudrait :

-- Un renouvellement du parc automobile et l'amélioration de la fluidité de la circulation.

- Améliorer le transport public pour réduire les déplacements individuels motorisés

-Réduire les émissions dues au trafic routier en imposant l'intégration du pot catalytique dans tous les véhicules ; un véhicule équipé de catalyseur arrive à réduire la pollution de plus de 95 %.

-Utiliser des énergies propre comme le gaz naturel carburant (GNC) et le gaz de pétrole liquéfié(GPL).

-Dans le secteur industriel, il est recommandé de mettre en œuvre les mesures de réduction des émissions du NO₂. Ces mesures peuvent comprendre des dispositions telles que la stabilisation ou le ralentissement de procédé ou de l'installation afin de minimiser les rejets.

-Il faut également s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs de dépollution (dépoussiérage...)

Une éventuelle étude durant la saison estivale est à programmer afin d'évaluer le taux d'émission du NO₂ sous l'effet des épisodes photochimiques.

ANNEXE :

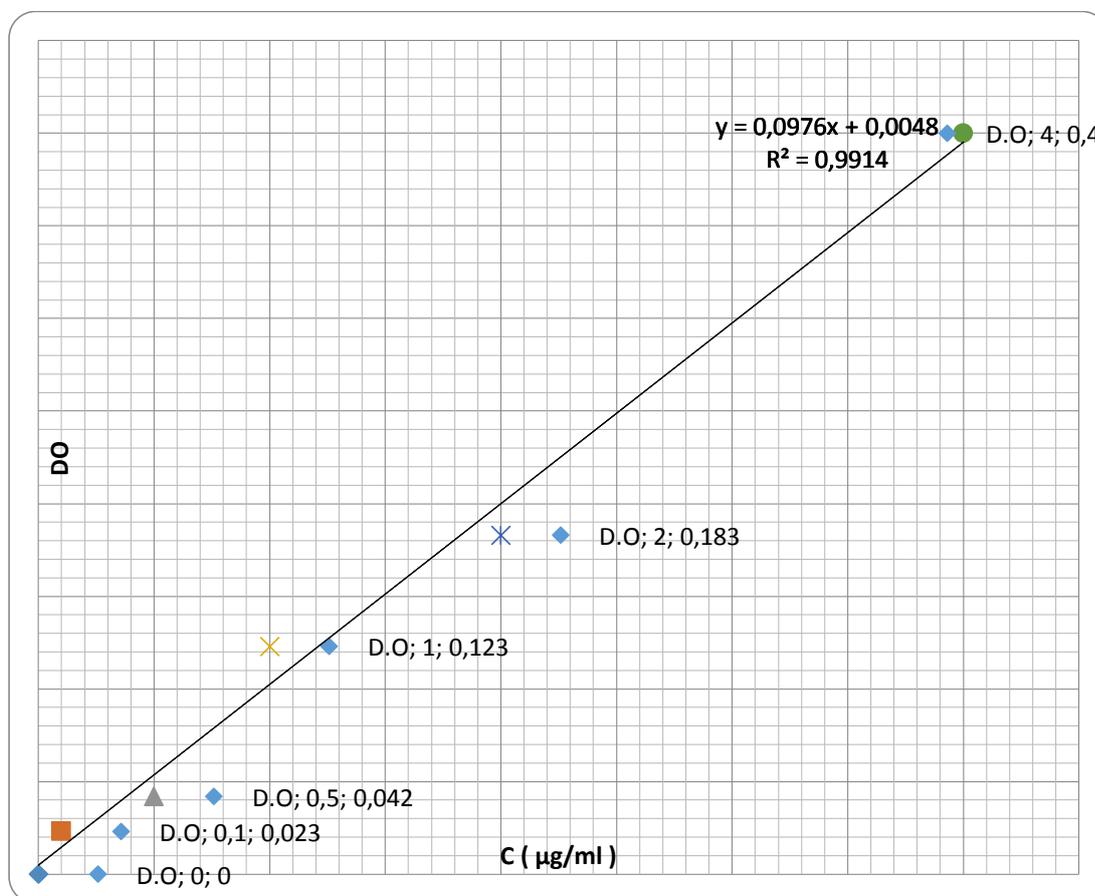
Courbe d'étalonnage :

On prélève 0,5 ml de la solution de nitrite de sodium qu'on introduit dans une éprouvette de 10 ml en plastique ou en verre avec bouchon en y versant 5 ml de reactif sulfanilamide. Après agitation et repos de 5 minutes, on y ajoute 1 ml de reactif *NEDA*, on agite de nouveau et laisse au repos pendant 10 minutes

On mesure alors la densité optique par comparaison à l'eau à 537nm sur un appareil UV-visible de type SHIMADZU mini 1240 (SHIMADZU) PC.

Tableau : Variation des concentrations en fonction des DO.

C	0	0,1	0,5	1	2	4
D.O	0	0,023	0,042	0,123	0,183	0,4



Courbe d'étalonnage des nitrites : $DO = f(C)$.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Masclet P., « Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives », Edition Ellipse, Paris, 2005.
- [2] Kebabian P. L., *A Practical Alternative to Chemiluminescence Detection of Nitrogen Dioxide: Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy*, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 2008 pp. 6040-6045]
- [3] DELGADO J.M. and V.ESTEVE: Evolution of NO_x levels measured by means of passive samplers at a Mediterranean coastal area, *Geophysical Research Abstracts*, Vol.5, 01971, 2003].
- [4] Kerbachi R, Y Kerchich and Y. Moussaoui. Assessment of Air Pollution by Aromatic Compounds BTEX in Algiers, *AWER Procedia Advances in Applied Sciences*, Vol 1,, pp. 351-357]
- [5] Boughedaoui M., R. Kerbachi, Kessali D. et R. Jourard, Mesure de la pollution plombifère dans l'air ambiant d'Alger, *Poll. Atm. (France)*, N°181, 2004, pp. 105-111,
- [6] Kerbachi R., et al., Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in algiers. Atmospheric
- [7] Bruno Sportisse ; *Pollution atmosphérique : des processus à la modélisation*. Springer, 2008.
- [8] Delmas R., Mégie G et Peuch V.H., *Physique et chimie de l'atmosphère*, Berlin, 2005
- [9] Dervent, R.G., T.J., Delaney, M., Dollard, G.J., Field, R.A., Dumitrescu, P., Nason, P.D., Jones, B.M.R., Repler, S.A., 2000 ; Analysis and interpretation of the continuous hourly monitoring data for 26 C₂ – C₈ hydrocarbons at 12 United Kingdom sites during 1996. *Atmospheric Environment* 2000; 34: 297 – 312.
- [10] BOUHILA KHODJA Zohra, Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les métaux lourds en utilisant la méthode d'Analyse par Activation Neutronique, mémoire de magister, ENP, 2010.
- [11] V. Buchard, P. Helfer, P. Mattle, C. Muller, Etude de la Pollution Atmosphérique Transfrontalière (EPAT), rapport de campagne d'étude, Lausanne, 2000
- [12] Education au développement durable, académie d'Amiens, <http://crdp.ac-amiens.fr>
- [13] Campagne de mesure du dioxyde d'azote par tubes à diffusion passive rue d'Antrain a Rennes, Airbreizh, avril 2004.
- [14] Office fédérale de l'environnement, des forêts et du paysage «L'ozone troposphérique» Cahier de l'environnement, Berne, 1996.
- [15] Martyna KUSKE, Jacques NICOLAS, Les pollutions dans l'air à l'intérieur des bâtiments (Diagnostic Incidences sur la santé).
- [16] J. D, Butler, « Air pollution chemistry », Academic Press, London, 1979.]
- [17] Toro M.V., Cremades L.V. and Calbo J. Relationship between VOC and NO_x emissions and chemical production of tropospheric ozone in the Aburra Valley (Colombia). *Chemosphere*, 65, 2006, pp 881-888
- [18] Sandrine BOURDET, Serge RAPENNE Etude de la distribution du dioxyde d'azote par la méthode des tubes passifs sur l'agglomération nancéenne Été - Hiver

- [19] V. Buchard, P. Helfer, P. Mattle, C. Muller, Etude de la Pollution Atmosphérique Transfrontalière (EPAT), rapport de campagne d'étude, Lausanne, 2000
- [20] Nicolet Mathieu, Morand Nicolas, Rochat David, Tschärner Thomas Qualité de l'air : Etude Différentielle de deux Vallées Alpines, Lausanne, novembre 2002
- [21] Les lois physiques de l'automobile www.adilca.com
- [22] agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail 253, avenue du Général Leclerc 94701 Maisons-Alfort Cedex afsset@afsset.fr
- [23] www.airpl.org
- [24] www.emwelt.lu.
- [25] Décret exécutif n° 06-02 du 7 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique
- [26] Segunda GARCIA-FOUQUÉ, Jean-Luc HOUDRET, Hervé PLAISANCE avec la collaboration technique de Stéphanie SAUVAGE et Benoît HERBIN (SYNTHÈSE DE L'EXPÉRIENCE ACQUISE PAR LES RÉSEAUX SUR L'ÉCHANTILLONNAGE PASSIF DU NO₂). mai 2000.
- [27] F. Rouessac, A. Rouessac, D. Cruché ; Dunod Analyse Chimique, Méthodes et techniques instrumentales modernes, 6ème édition, Paris, 2004.
- [28] LOUIS Yoann et NOIRTIN iric, Travail d'Étude et de Recherche : Suivi géochimique du Gapeau, 2004.
- [29] Rapport technique sur la campagne de mesures réalisée sur l'agglomération mulhousienne– Rapport ASPA, 02031901-I-D, Du 06/02/01 au 20/03/01 et du 22/05/01 au 04/07/01.
- [30] Berlin Environmental Atlas – 03.11 Traffic-Related Air Pollution – NO₂ and PM₁₀ (Edition 2008).
- [31] Manual radiello FR (<http://www.radiello.com>)
- [32] Martyna KUSKE, Jacques NICOLAS, Les pollutions dans l'air à l'intérieur des bâtiments (Diagnostic Incidences sur la santé).
- [33] P.L. Keabian, E.C. Wood, S.C. Herndon, and A. Freedman, Environ. Sci. Technol., 'A Practical Alternative to Chemiluminescence Detection of Nitrogen Dioxide: Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy', (2008)
- [34] Plan Régional pour la Qualité de l'Air Lorraine – août 2001
- [35] CENTRE CLIMATOLOGIE NATIONALE de l'ONML
- [36] le réseau de la surveillance de la qualité de l'air à Alger (SAMASAFIA).
- [37] Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de NO₂ de véhicules diesel, et aspects sanitaires associés, afsset, 2009 AIR LIQUIDE, 2012.

[38] Programme des nations unis pour l'environnement, GEO4, 2007

[39] le rapport de responsabilité et de développement durable, document de référence : AIR LIQUIDE, 2012.