

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département : Génie Environnement



Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de Magister

Présenté par :
ABOUN DJAALALI NOURA
Ingénieur d'Etat en Chimie Industrielle

**ETUDE PAR ECHANTILLONNAGE PASSIF DE
LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES BTEX A
ALGER EST**

Présidente :	Mme Harik Djamila	Professeur, ENP
Directeur :	Mr. Kerbachi Rabah	Professeur, ENP
Examineurs :	Mr. Lounici Hakim	Professeur, UMMTO
	Mr. Boughedaoui Menouer	Dr. Chargé de cours U.Blida
	Mr. Namane Abdelkader	Dr. Chargé de cours ENP

Juin 2008

Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger.
www.enp.edu.dz

ملخص :

يهتم هذا العمل بدراسة تلوث الهواء عن طريق BTEX في بلديات من شرقي العاصمة و ذلك بتطبيق تقنية العينات و إختيارها. وقد تم تحديد المواقع (مواقع حضرية و مواقع جوارية). و تشير النتائج المحصل عليها أن كمية Bz هي 2 لغ و أن مجموع BTEX يصل الى مستوى يقدر بـ 5,8.

و يتبين كذلك أن المواقع الجوارية المتعرضة مباشرة للإفرازات الناجمة عن حركة المرور تسجل نسب BTEX% تقدر بـ 15. أي نسبة تفوق تلك المسجلة في المواقع الحضرية.

و تجدر الإشارة الى أن هناك علاقة مهمة بين العوامل المدروسة.

وقد تم استغلال النتائج المحصل عليها من خلال برنامج SIG من أجل التوفر على بنك للمعلومات في المتناول

مفاتيح :

تقنية العينات و اختيارها، راديلو، بن زان، BTEX، حركة المرور، تلوثةالجو.

Résumé :

Le présent travail porte sur l'étude de la pollution de l'air par les BTEX dans douze communes de l'Est d'Alger en appliquant la technique d'échantillonnage passif. Quarante sites de mesures (Sites urbains de fond et sites de proximité) ont été retenus. Les résultats obtenus montrent que les teneurs en Benzène sont de l'ordre de $2 \mu\text{g.m}^{-3}$ et l'ensemble des BTEX atteint un niveau de l'ordre de $5,8 \mu\text{g.m}^{-3}$ BTEX.

Les sites de proximité exposés directement aux émissions du trafic routier, accusent des teneurs en BTEX qui sont environ 15 % plus élevées que ceux des sites urbains de fond.

A noter par ailleurs qu'il existe des corrélations entre les facteurs étudiés.

Les résultats obtenus ont été exploités sur Système d'Information Géographique afin de disposer d'une base de données accessible.

Mots clés : échantillonnage passif, Radiello, benzène, BTEX, trafic routier, pollution de l'air, Alger

Abstract :

The present work is about the air pollution by the BTEX. twelve districts in east Algiers have been selected as urban and traffic sites where the passive sampling technique has been used. The results show that Benzène concentration is about $2 \mu\text{g.m}^{-3}$ and the BTEX rate is about $5,8 \mu\text{g.m}^{-3}$.

The traffic sites exposed to road traffic show a BTEX rate of about 15 % higher than urban site.

The results obtained have been processed in Map info software in order to set up accessible data base.

Key word : passive sampling technique, Radiello, benzene, BTEX, road traffic, air pollution, Algiers

SOMMAIRE

Page

I- INTRODUCTION	1
II- GENERALITES SUR LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES BTEX.....	3
II-1- Généralités sur la pollution de l'air par le benzène.....	3
1-Définition	3
2-Utilisations	3
3-Benzène substitué	5
4-Sources d'émission.....	5
5-Effets sur la santé	8
6-Teneurs atmosphériques en benzène dans le monde	12
7- Normes et réglementation	12
II-2- Pollution de l'air par le toluène	14
1-Définition, origine et utilisation.....	15
2- Sources d'émission.....	15
3- Effets sur la santé	15
4- Teneurs atmosphériques	16
5- Normes et réglementation.....	17
II-3- Pollution de l'air par les xylènes	17
1- Définition, origine et utilisation des xylènes	17
2- Sources d'émission des xylènes.....	18
3- Effets sur la santé.....	18
4- Normes et réglementation.....	19
5- Teneurs atmosphériques.....	19
II-4- Pollution de l'air par l'éthylbenzène	20
II-5- Réactivités et transformations chimiques des BTEX dans l'atmosphère	20
1- Mécanisme de réaction du radical OH·	21
2- Réactivité des BTEX	24
II-6- Les méthodes de prélèvement et d'analyse des BTEX	25
1- Mesure manuelle des BTEX.....	25
2- Mesure automatique des BTEX.....	27
III- METHODOLOGIE EXPERIMENTALE.....	28
III-1- Tubes échantillonneurs passifs.....	28
III-2- Tubes à diffusion « Radiello ».....	29
III-3- Analyse des échantillons	34
1- Désorption	34

2- Analyse par Chromatographie en Phase Gazeuse	35
III-4- Zone d'étude.....	35
1- Situation géographique et données démographiques des communes suivies	35
2- Organisation de la campagne de mesure.....	37
Choix des sites.....	37
Sites de proximité automobile.....	37
Sites de pollution urbaine de fond.....	37
III-5- Données météorologiques	40
1- Température et humidité.....	40
2- Etude des vents.....	43
IV- RESULTATS ET DISCUSSION.....	44
IV.1. Teneurs en BTEX	44
1- Temps de rétention des BTEX	44
2- Teneurs atmosphériques en BTEX.....	45
3- Composition massique (%) et rapports dans les BTEX	49
4- répartition des BTEX par commune	50
5-Corrélation entre les polluants et autres paramètres.....	56
5- Comparaison des niveaux de pollution aux normes	60
IV-2- Exploitation du Système d'Information Géographique	61
V- CONCLUSION.....	63
Bibliographie	65
Annexe 1.....	72
Annexe 2.....	74
Annexe 3.....	75
Annexe 4.....	76
Annexe 5.....	77
Annexe 6.....	78
Annexe 7.....	79
Annexe 8.....	80
Annexe 9.....	81

I- INTRODUCTION

Il est de nos jours reconnu qu'en milieu urbain, les activités de transport, en particulier le trafic automobile, constituent l'une des principales sources de la pollution de l'air ambiant.

La combustion incomplète qu'on retrouve dans la quasi-totalité des véhicules et l'évaporation des carburants dans les moteurs et en station de service sont, entre autre, à l'origine d'une forte émission de composés organiques volatils (COV).

Ces COV renferment une forte proportion d'hydrocarbures aromatiques monocycliques dont le benzène et ses homologues supérieurs, toluène, éthylbenzène et xylènes.

Parmi ces composés qu'on désigne le plus souvent par le terme BTEX, le plus préoccupant est le benzène, compte tenu de sa nocivité, des niveaux habituellement mesurés et de la réglementation qui est devenue de plus en plus sévère.

La nature des carburants des véhicules, plus spécialement leur proportion en aromatiques, influe sur les teneurs atmosphériques. L'essence contient environ 30 à 40 % d'aromatiques et 2 à 3 % de benzène.

Parallèlement à leur action directe sur l'homme (le benzène est un produit cancérigène), les BTEX engendrent la formation, par réaction dans la troposphère avec les radicaux libres, d'autres polluants, dits secondaires, comme l'ozone et certains aldéhydes qui, eux aussi, exercent des nuisances sur l'homme et son environnement.

Aussi et afin de réduire l'ampleur de cette forme de pollution, la Communauté Européenne et d'autres pays développés exigent des carburants avec une teneur maximale de 1% en benzène et 35% en aromatiques totaux.

A Alger, le parc automobile connaît une très forte croissance, et ce de part les facilités d'achat mises en place dans l'acquisition d'un véhicule et l'amélioration des conditions socio-économiques de la population; il en résulte que la pollution automobile deviendra de plus en plus préoccupante.

En terme de pollution par les BTEX, le réseau de surveillance de SAMASAFIA a pu suivre en 2003 leurs évolutions sur un seul site (Ben Aknoun). Une étude réalisée sur le thème a alors posé la question de la pertinence et de la représentativité de l'emplacement de cette station automatique. L'étude a en effet montré que ce site considéré initialement comme site urbain de fond était plutôt représentatif d'un site de proximité [1].

Dans ce réseau comme dans tout réseau de surveillance de la qualité de l'air, on devrait vérifier s'il répond aux besoins de caractérisation des teneurs ambiantes à la fois en situation urbaine de fond, là où de fortes concentrations de populations vivent ou travaillent, mais aussi

dans des environnements dits de « proximité » où les teneurs sont sensiblement plus élevées mais les durées d'exposition plus courtes.

La meilleure approche ne consiste pas à augmenter indéfiniment le nombre de stations automatiques, ce qui est très coûteux, mais d'affiner le choix des sites par des études larges utilisant par exemple la technique des tubes à diffusion passive.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressés à l'évolution des teneurs atmosphériques en BTEX à Alger Est par la méthode des tubes échantillonneurs passifs. Une fois installés, ces tubes collectent spécifiquement les polluants présents dans l'air ambiant et permettent ainsi d'estimer une concentration moyenne sur la durée d'exposition.

L'utilisation des tubes passifs permet de réaliser des mesures sur des zones beaucoup plus vastes et de déterminer, avec un coût acceptable, la distribution spatiale des polluants à l'immission.

II- GENERALITES SUR LA POLLUTION DE L’AIR PAR LES BTEX:

Les composés : benzène, toluène, éthyylbenzène et xylènes désignés généralement par le terme BTEX, font partie de la famille des composés organiques volatils. Ce sont des hydrocarbures aromatiques monocycliques constitués d’un cycle aromatique qui est substitué par un groupement méthyle (CH₃) dans le cas du toluène et par deux groupements dans le cas des xylènes [2]. La pollution de l’air par les BTEX résulte principalement des activités anthropiques suivantes :

- Les industries pétrolières
- Les industries chimiques et l’utilisation de solvants
- Le secteur du transport

II-1- Généralités sur la pollution de l’air par le benzène :

1- Définition :

Le benzène est un hydrocarbure aromatique monocyclique, de formule C₆H₆, c’est un constituant naturel du pétrole brut, mais il est généralement synthétisé à partir d’autres composés organiques présents dans le pétrole.

Le benzène est un liquide incolore, très volatil, peu soluble dans l’eau mais miscible dans la plupart des solvants organiques. Il a une odeur aromatique perceptible dans l’air, selon les individus, entre 1 et 12 ppm, soit un seuil olfactif compris entre, 3,2 et 39 mg.m⁻³ [3]. A température ordinaire, le benzène reste un produit stable mais très inflammable.

Le benzène est produit lorsque des composés riches en carbone subissent une combustion incomplète. Par exemple, il est produit naturellement dans les volcans ou les incendies de forêts. Il est également présent dans la fumée de cigarette.

D’après l’OMS, le benzène est classé comme étant un composé cancérigène et présentant un facteur de risque important dans l’apparition de leucémies.

2-Utilisations :

Avant les années 1920, le benzène était fréquemment utilisé comme solvant industriel, particulièrement pour dégraisser les métaux. Lorsque sa toxicité devint évidente, il fut

remplacé par d'autres solvants pour les applications nécessitant une exposition directe de l'utilisateur.

Le benzène est utilisé en majeure partie comme intermédiaire dans la synthèse d'autres composés chimiques. Les dérivés du benzène produits en grandes quantités sont le styrène, utilisé pour fabriquer des polymères et des plastiques, le phénol, utilisé pour fabriquer des résines et des adhésifs, et le cyclohexane, utilisé pour fabriquer le nylon. Des quantités moins importantes de benzène sont utilisées dans la fabrication de pneus, de lubrifiants, de colorants, de détergents, de médicaments, d'explosifs ou de pesticides [4]. Dans les années 1980, les principaux composés produits à partir du benzène étaient l'éthylbenzène (intermédiaire pour la fabrication du styrène) avec 48% de la consommation du benzène utilisé pour la synthèse, le cumène 18%, le cyclohexane 15% et le nitrobenzène 7% [2-5].

En tant qu'additif à l'essence, le benzène permet d'augmenter l'indice d'octane, agissant donc comme antidétonant. De ce fait, jusque dans les années 1950 l'essence contenait fréquemment quelques pour cent de benzène, quand il fut remplacé par le tétraéthylplomb dans les additifs antidétonants les plus utilisés. Cependant, le benzène a fait son retour dans de nombreux pays suite aux réglementations concernant la teneur en plomb de l'essence. Aux USA, les préoccupations concernant ses effets nocifs sur la santé et la possibilité de contamination des nappes phréatiques ont conduit à la mise en place d'une réglementation stricte concernant la teneur en benzène des carburants avec une limite voisine de 1%. En Europe, cette même limite de 1% a été fixée au début des années 2000 [6].

A noter que l'essence automobile associe la réduction de plomb à l'augmentation de benzène, c'est à dire que l'on retrouve plus de benzène dans l'essence sans plomb que dans le super carburant et l'essence ordinaire.

La principale source de pollution environnementale par le benzène est représentée par les émissions automobiles.

La production de benzène de l'Europe occidentale est de 7,6 millions de tonnes pour une production mondiale de 33 millions de tonnes (1994) [7].

En Algérie, les carburants essence contiennent 2 à 3% de benzène (taux variable selon la raffinerie considérée : Alger, Arzew, Skikda). Ainsi les quelques deux millions de tonnes de carburant essence, produits annuellement, contiennent environ 50000 tonnes de benzène [8].

3- Benzène substitué :

Un grand nombre de composés chimiques très importants dans l'industrie sont obtenus en remplaçant un ou plusieurs atomes d'hydrogène du benzène par d'autres groupes fonctionnels.

Substitution par des groupements alkyles

- le toluène $C_6H_5-CH_3$
- l'éthylbenzène $C_6H_5-CH_2CH_3$
- le xylène $C_6H_4(-CH_3)_2$
- le triméthylbenzène $C_6H_3(-CH_3)_3$

4- Sources d'émission :

Les sources d'émission naturelles du benzène sont principalement les feux de forêts et les activités volcaniques. Les sources anthropiques d'émissions sont de loin les plus importantes. Le trafic routier est le premier responsable de la pollution de l'air par le benzène. C'est ainsi qu'on estime qu'en milieu urbain plus de 90% du benzène provient du trafic routier [9]. Des mesures effectuées en France, par journée interdite à la circulation (le 22 septembre de chaque année) ont montré une réduction de 70% du benzène atmosphérique. Cette réduction a été constatée aussi sur le toluène et les xylènes [10]. Ceci montre l'importance du trafic routier dans l'émission des BTEX.

Le benzène est rejeté dans l'atmosphère par évaporation pendant le transport et les ravitaillements en carburant aux stations service, mais aussi du fait des processus de combustion incomplète des véhicules à moteur. Dans ce contexte, il faut souligner que le benzène est aussi produit lors de la combustion de l'essence dans le moteur, ce qui fait que même si l'essence ne contenait pas du tout de benzène, les imbrûlés des gaz de combustion, eux, en contiendraient [11].

La proportion de benzène issue des processus d'évaporation est faible. L'essentiel du benzène émis est véhiculé par les gaz d'échappement. Un véhicule non catalysé émet environ 60-70 mg/Km [12]. On estime par ailleurs que 4.10^6 tonnes de benzène sont émises chaque année suite à la combustion des fiouls fossiles [12].

La fabrication du benzène et ses diverses utilisations libèrent également du benzène dans l'atmosphère, mais en quantité très faible par rapport au trafic routier.

En 1993, les émissions de benzène ont été estimées en France à 80 000 tonnes par an, réparties sur plusieurs sources (tableau 1) [13].

Tableau n° 1 : Emissions de benzène par secteur d'activité en France [13]

<i>Sources</i>	<i>Emission de benzène (%)</i>
Combustion	29,6 – 37,1
Raffinage du pétrole	0,21 – 0,23
Pétrochimie	0,20 – 0,22
Cokerie	0,61 – 0,68
Impression offset	0,13 – 0,15
Distribution d'essence	0,67 – 0,75
Evaporation d'essence des réservoirs automobiles	8,0 – 8,9
Echappement des véhicules	48,5 – 54,3
Machines et véhicules hors route	4,3 – 4,8
Feux de forêts	0,15 – 0,17
Incinération des déchets agricoles	0,19 – 0,21

Avec l'échappement des véhicules et l'évaporation d'essence au niveau des réservoirs, le trafic automobile est à l'origine de pratiquement 60 % du benzène total émis. Par ailleurs, une part importante (35 %) des émissions est également imputable aux installations de combustion, notamment les installations de chauffage résidentiel.

En 2002, les émissions de benzène s'élevaient en France à 40,1 kt, ce qui représentait, 2,6 % des émissions totales de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM). La principale source d'émission est le résidentiel tertiaire avec 57,3 % des émissions globales, suivi du transport routier avec 25,9 % des émissions (figure n° 1) [14].

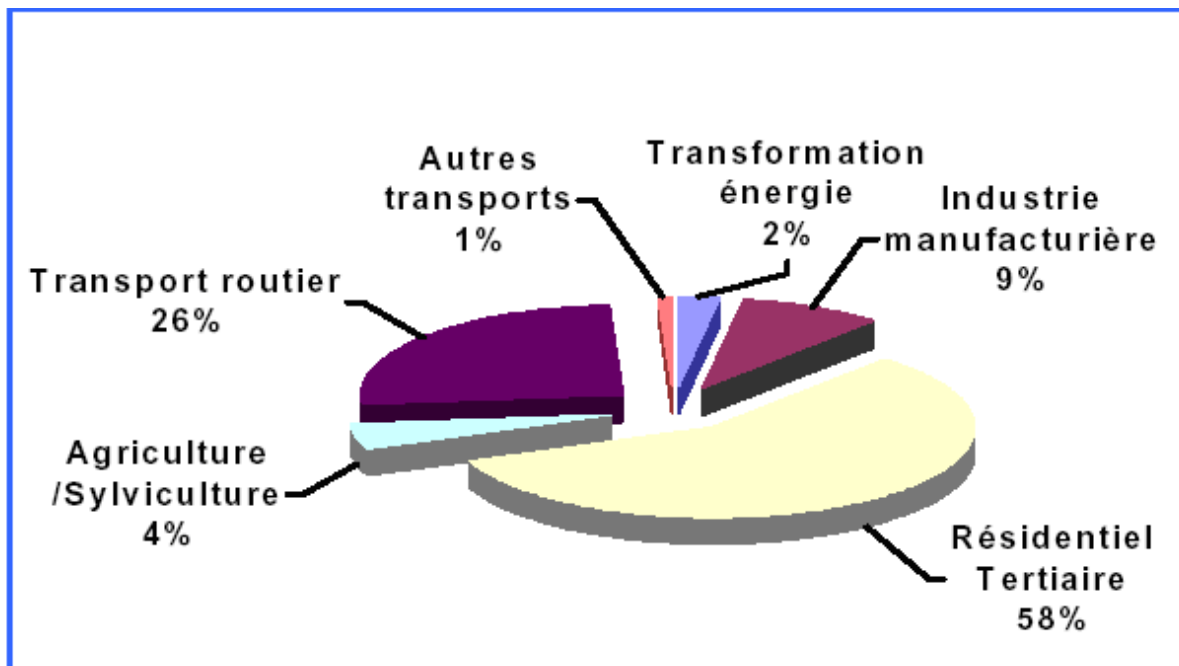


Figure n°1 : Distribution des émissions françaises de benzène par secteur d'activité en 2002

La réglementation de la teneur en benzène des carburants est passée de 5 % à 1 % maximum en volume, au 1er janvier 2000 (Directive 98/70/CE du 13 octobre 1998). La part des émissions ayant pour origine les transports routiers est ainsi passée de 32 % à 26 % du total des émissions entre 1999 et 2002 [14].

Pour réduire ces émissions anthropiques, des techniques de traitement et de prévention existent et sont mises en œuvre dans les pays développés [11]. On agit en général à plusieurs niveaux :

a) Maîtriser les systèmes d'utilisation d'essence :

En empêchant l'évaporation du carburant, on évite l'évaporation du benzène et on réduit en même temps l'émission d'autres COV, sources de pollution.

Pour réduire les pertes par évaporation au cours du stockage et des manipulations de carburant, on équipe les dépôts pétroliers et les camions citernes de systèmes de récupération des vapeurs d'essence. Il est ensuite possible de réduire les émissions des véhicules eux-

mêmes en les équipant de pièges à charbon actif au niveau du réservoir et de l'alimentation du moteur [15].

b) Utiliser des pots catalytiques :

Pour s'attaquer à la cause principale des émissions dues aux gaz d'échappement, on a généralisé l'utilisation des catalyseurs à trois voies qui oxydent les imbrûlés organiques et donc le benzène en CO₂ et vapeur d'eau. Le rendement de ces catalyseurs est supérieur à 90%.

c) Réduire la teneur en benzène des essences :

La troisième action consiste à réduire la teneur en benzène. Certains pays se sont engagés à produire de l'essence à un taux maximum de 1 % de benzène. Cette solution est coûteuse mais possible. L'industrie du pétrole estime toutefois que cette mesure n'aura qu'une faible efficacité [11].

5- Effets sur la santé :

L'inhalation d'un taux très élevé de benzène peut causer la mort, tandis que des teneurs importantes peuvent occasionner des somnolences, des vertiges, une accélération du rythme cardiaque, des maux de tête, des tremblements, la confusion ou la perte de connaissance. Une exposition de cinq à dix minutes à un taux de benzène dans l'air de 2 % environ suffit pour entraîner la mort. La dose létale par ingestion est de 50 mg/kg [16]. L'ingestion de nourriture ou de boissons contenant des taux élevés de benzène peut occasionner des vomissements, une irritation de l'estomac, des vertiges, des somnolences, des convulsions, une accélération du rythme cardiaque, voire la mort [17-19].

L'effet principal d'une exposition chronique au benzène est un endommagement de la moelle osseuse, qui peut occasionner une décroissance du taux de globules rouges dans le sang et une anémie [20,21]. Il peut également occasionner des saignements et un affaiblissement du système immunitaire. L'effet du benzène sur la fertilité de l'homme ou le bon développement du fœtus n'est pas connu. Enfin, le benzène est définitivement reconnu comme étant une substance cancérigène [19, 21,22].

La valeur limite d'exposition professionnelle dans l'Union Européenne est fixée par la réglementation à 1 ppm soit $3,5 \text{ mg.m}^{-3}$ sur 8 heures. La teneur en benzène des eaux destinées à la consommation humaine ne doit pas dépasser $1 \mu\text{g.l}^{-1}$ (à l'exception des eaux minérales) [23].

a) Propriétés cancérigènes du benzène

Les propriétés cancérigènes du benzène proviennent de ce qu'il se comporte comme un agent intercalant (c'est-à-dire qu'il se glisse entre les bases nucléotidiques des acides nucléiques, dont l'ADN, provoquant des erreurs de lecture et/ou de réplication). Il existe d'autres agents intercalants (comme le bromure d'éthidium, ou BET, utilisé en biologie expérimentale pour marquer l'ADN notamment au cours des électrophorèses) [24]. Tous les composés plans ne sont toutefois pas cancérigènes. L'acide benzoïque, par exemple, très proche du benzène, et dont la base conjuguée est absolument plane, n'est pas cancérigène (il est utilisé comme conservateur dans divers types de soda). De même la phénylalanine, un acide aminé qui comporte un groupement phényle (un cycle benzénique), n'est pas cancérigène [25].

b) Prévention

- Prévention collective :

Des mesures de prévention strictes doivent être observées. Le contrôle de l'exposition est annuel si la concentration est inférieure à 1 ppm. Quand la concentration au poste de travail est susceptible de dépasser 1 ppm, ($3,2 \text{ mg.m}^{-3}$), ce poste doit être soumis à des contrôles réguliers dont la fréquence dépend du niveau de concentration et dont les résultats doivent être transmis au médecin du travail.

Par ailleurs, Il est interdit d'employer des dissolvants ou diluants renfermant plus de 0,1% de benzène [20, 21,22].

Le stockage et la conservation des déchets contenant du benzène doivent scrupuleusement respecter la législation.

- Prévention individuelle :

Elle doit faire bénéficier le salarié d'une protection cutanée : vêtements de travail (à séparer des vêtements de ville) et oculaire (lunettes).

Les salariés doivent recevoir une formation adéquate.

c) Surveillance en milieu du travail :

Les travailleurs exposés au benzène sont soumis à une surveillance médicale spéciale avec surveillance hématologique périodique : formule leucocytaire, hématoците et plaquettes qui permettront, en dehors des examens biométriologiques, la suspicion d'une intoxication benzénique [23,24].

- Biométriologie :

La surveillance à ce niveau est basée sur la mesure du toxique dans les liquides biologiques ou l'air expiré ainsi que leurs métabolites. Il existe cependant plusieurs paramètres d'évaluation de l'imprégnation benzénique dont certains sont plus spécifiques que d'autres.

- **Le benzène sanguin et urinaire** : leurs dosages n'ont d'intérêt que quand ils sont réalisés par une méthode très sensible. Le jour du prélèvement est indifférent; en début de poste pour le benzène sanguin et en fin de poste pour le benzène dans les urines (50 mg/g de créatinine : l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)).

- **Le benzène dans l'air expiré** se mesure avant le début du poste. L' American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) recommande les indices d'exposition suivants : 0,08 ppm dans l'air expiré total et 0,12 ppm en fin d'expiration.

- **Les phénols urinaires totaux** sont un bon indicateur pour des expositions importantes (taux supérieur à 10 ppm) avec une bonne corrélation avec la concentration atmosphérique ; ils manquent cependant de spécificité pour de petites expositions (interaction de produits aromatiques et phénoliques, variations individuelles...).

- **L'acide transmuconique urinaire** est plus spécifique et paraît être un bon indicateur biologique de l'exposition au benzène. Les valeurs guides recommandées en France sont de 5 mg par litre (fin de poste) [19].

Les limites recommandées par l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) pour l'exposition au benzène au poste de travail sont :

Moyenne pondérée en fonction du temps (TLV-TWA) : 0,5 ppm

Limite d'exposition de courte durée (TLV-STEL) : 2,5 ppm

Pour évaluer dans l'environnement le risque cancérogène pour une exposition donnée, il existe des indicateurs sanitaires. Ces indicateurs sont exprimés sous forme d'excès de risque de développer un cancer du à une exposition vie entière à une unité de dose de benzène ; on les appelle excès de risque unitaire (ERU) ou risque unitaire (RU). Ces valeurs de risque unitaire sont le résultat d'extrapolation des hautes doses vers les faibles doses issues d'études toxicologiques reconnues [25].

Pour le benzène, il existe différentes valeurs de RU qui dépendent de l'organisme émetteur. Les deux instances les plus connues sont l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'Environment Protection Agency (EPA) des Etats-Unis. Pour l'OMS la valeur guide relative à la qualité de l'air émise en 1999 [25] et actuellement en vigueur est un risque unitaire exprimé par :

$$\text{OMS : } \text{RU } [\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]^{-1} = (4,4 - 7,5) 10^{-6}$$

Cela signifie que pour une exposition vie entière à une unité de dose de benzène, soit $1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, tout individu a $4,4$ à $7,5 \cdot 10^{-6}$ chance supplémentaire de développer un cancer (une leucémie dans le cas du benzène)

De la même façon, l'EPA émet également une estimation quantitative du risque cancérigène dû à une exposition vie entière par inhalation de benzène [26].

$$\text{EPA : } \text{RU } [\mu\text{g m}^{-3}]^{-1} = (2,2 - 7,8) 10^{-6}$$

Exemple :

Risque = 10^{-4} ou 1/10000 pour des concentrations de 13 à 45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Risque = 10^{-5} ou 1/100000 pour des concentrations de 1.3 à 4.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Risque = 10^{-6} ou 1/1000000 pour des concentrations de 0.13 à 0.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

6- Teneurs atmosphériques en benzène dans le monde :

A l'inverse des autres polluants classiques comme les SO₂, le CO et les NO_x, le benzène et les autres hydrocarbures aromatiques monocycliques ne font l'objet d'un suivi régulier que depuis le début des années 90. Il n'existe donc pas un historique du benzène en tant que polluant atmosphérique. C'est naturellement en Europe occidentale, au USA et Canada qu'on rencontre le plus d'études et de données.

En milieu ambiant non pollué, l'air contiendrait environ 0,3 µg.m⁻³ [27]. Aux Etats Unis, les concentrations urbaines en benzène sont comprises entre 12 et 25 µg.m⁻³. Elles sont de l'ordre du µg m⁻³ et ne dépassent pas 5 µg.m⁻³ en zones rurales [28].

Dans les grandes villes canadiennes comme Montréal, Ottawa et Toronto, les teneurs moyennes varient entre 2,3 et 11,4 µg.m⁻³ [29].

Une récente étude effectuée dans 6 villes du nord au sud de l'Europe par le laboratoire de référence européen pour la pollution de l'air (ERLAP à Ispra) a montré que les taux de concentrations du benzène dans l'air urbain atteignent des niveaux de plus en plus élevés au fur et à mesure que l'on descend vers le sud de l'Europe. Les niveaux ambiants du benzène, dus au trafic automobile urbain, sont de 3,3 µg m⁻³ à Copenhague et de 24,9 µg.m⁻³ à Athènes [30].

Les teneurs atmosphériques en benzène sont d'une manière générale tributaires de l'intensité du trafic routier et du confinement du milieu (absence ou non de ventilation). C'est ainsi qu'à Paris le taux de benzène s'élève à 4 µg.m⁻³ en site de fond, à 14µg.m⁻³ au bord des rues, à 32.5µg.m⁻³ au niveau des carrefours et à 109 µg.m⁻³ en parking souterrain [9]. Les agents de police effectuant un service dans les rues, le personnel des stations- service et les conducteurs de camions citernes de carburant sont souvent exposés à des teneurs très élevées en benzène. [31].

7- Normes et réglementation en vigueur dans certains pays :

La réglementation régissant les teneurs en benzène dans l'air ambiant est très récente. Ce n'est en fait qu'à partir de 1995 que certains pays ont commencé à mettre en place des normes sous forme de :

- Valeur limite ou valeur légale qui est le niveau maximal de concentration à ne pas dépasser.

- Objectif de qualité qui représente un niveau de concentration fixé, sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs du polluant sur la santé humaine ou pour l'environnement, à atteindre dans une période donnée. Le tableau n° 2 résume les normes adoptées par certains pays.

Tableau n° 2 : Teneurs limites en benzène adoptées par certains pays

<i>Pays</i>	<i>Valeur limite</i> $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	<i>Objectif de qualité</i> $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	<i>Observations</i>	<i>Réf.</i>
<i>France</i>	10		Moyenne annuelle jusqu'à 2005 Puis dégressif de $1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ par an jusqu'à 2010	[32]
	5		Moyenne annuelle à partir de 2010	
			2	Moyenne annuelle
<i>Allemagne</i>	10		Moyenne annuelle à partir de 1998	[34]
<i>Pays-bas</i>	10		Moyenne annuelle	[35]
		1		
<i>Union Européenne</i>	5		Moyenne annuelle	[36]
<i>Angleterre</i>	5 ppb (16)		Moyenne annuelle	[12]
		1 ppb (3.2)	Moyenne annuelle	
<i>eilartsuA</i>	5 ppb (16)		Moyenne annuelle	[37]
<i>OMS et USA</i>	Pas de seuil limite mais des indicateurs des risques unitaires			

II-2- Pollution de l'air par le toluène :

1- Définition, origine et utilisation:

Le toluène a essentiellement été un produit de remplacement du benzène. Il donne maintenant lieu à son tour à d'autres produits de substitution. Par ailleurs, il est parfois associé au xylène, d'usage un peu plus commun.

Dissolvant remarquable, il serait un bon diluant pour les peintures à la cire. Il est émulsifiant de plusieurs peintures synthétiques et il n'est pas exceptionnel de le rencontrer dans des produits commerciaux relativement usuels. Il serait encore assez présent dans les bombes de peinture. Dans le cadre de ce type d'utilisations, il pourrait avoir été responsable de pathologies concernant une proportion non négligeable des utilisateurs de ces outils.

Le toluène est un aromatique liquide, transparent, incolore et qui dégage une odeur sucrée et piquante. C'est un composé volatil qui est inflammable et qui présente une tension de vapeur relativement élevée (3,4 kPa à 25°C). Le toluène est modérément soluble dans l'eau (535 mg.l⁻¹ à 25 °C) et est miscible avec la plupart des solvants organiques. Le seuil olfactif est de l'ordre de 0,2 ppm [38].

Le toluène est un constituant naturel du pétrole. Tout le toluène présent dans le carburant essence provient du procédé normal de raffinage et de transformation du pétrole brut. Sa teneur moyenne dans l'essence est de l'ordre de 8,3 % [2,34].

Pour les utilisations industrielles, le toluène est extrait du pétrole par déshydrogénation catalytique des fractions renfermant du méthylcyclohexane. Le toluène de qualité technique est pur à 98% et il contient jusqu'à 2% de xylènes et de benzène [38]

La principale utilisation du toluène est la production du benzène par le procédé d'hydrodésalkylation. Il est par ailleurs utilisé comme solvant dans les peintures, les vernis, les adhésifs, etc. [39].

Sa production mondiale est estimée à plus de 6 millions de tonnes par an ; les USA en produisent environ le tiers. Ces chiffres ne tiennent pas compte du toluène contenu dans les carburants et consommé dans les activités de transport [39].

2- Sources d'émission :

La principale source d'émission naturelle du toluène est donnée par la combustion incomplète dans les feux de forêts. Comme le toluène présente une pression de vapeur relativement élevée et une solubilité modérée dans l'eau, l'atmosphère influe beaucoup sur sa répartition. C'est ainsi qu'on estime que 99% du toluène rejeté dans l'environnement devraient être présents dans l'atmosphère, le reste est distribué dans l'eau et le sol [40,41].

Dans les pays industrialisés, les principales sources du toluène dans l'atmosphère sont les solvants utilisés dans les procédés industriels et les activités de transport. L'évaporation dans les circuits de distribution des carburants et la combustion incomplète des véhicules contribuent à environ 40% des émissions anthropiques. Des procédés industriels y contribuent à plus de 50 % [40].

On estime par ailleurs qu'un véhicule émet en moyenne 120 mg.Km^{-1} , soit environ le double du benzène [42].

3- Effets sur la santé :

Le toluène est rapidement et efficacement absorbé à travers les poumons (environ 50 à 80 %) [39] et une grande partie du toluène inhalé peut atteindre le cerveau avant d'être métabolisé par le foie, siège principal du métabolisme du toluène [43].

Initialement, le toluène se répartit dans les tissus hautement vascularisés et riches en lipides comme le cerveau, les reins et le foie, mais il s'accumule principalement dans les tissus adipeux [44]. Environ 20% de la dose absorbée est expirée telle quelle par les poumons. Le reste est métabolisé principalement par oxydation en alcool benzylique, lequel est oxydé par la suite en benzaldéhyde et en acide benzoïque. La majeure partie de l'acide benzoïque est conjuguée avec de la glycine pour former de l'acide hippurique avant son excrétion dans l'urine [45].

Les données relatives aux effets de l'exposition des humains au toluène proviennent d'études portant sur les effets de son utilisation abusive comme solvant ainsi que d'études épidémiologiques de travailleurs exposés [25,46].

Les études cliniques effectuées sur les volontaires portent sur des expositions répétées assez courtes (20mn à 8 heures) ou sur des expositions répétées (6 à 7 heures par jour pendant des périodes de 3 à 4 jours ou 8 heures deux fois par semaine, pendant une période de 8 semaines)

d'un nombre limité de sujets à des concentrations variant de 37,5 à 3000 mg.m⁻³. Dans la plupart de ces études il n'a pas été observé d'effets néfastes après une exposition à 375 mg.m⁻³ ou moins, pendant des périodes uniques de 20mn à 3,5 heures [47,48] ou après des expositions répétées de 3 à 7 heures pendant des périodes allant jusqu'à 3 jours, d'après divers tests des fonctions neurologiques [49]. Toutefois, on signale une diminution de la fonction neurologique, une augmentation de symptômes neurologiques et une irritation des voies respiratoires chez des volontaires exposés à 375 mg.m⁻³, 6 heures par jour, pendant 4 jours [50]. Ces effets empirent et persistent si la concentration augmente ou si l'exposition dure. On a aussi signalé dans plusieurs études, moins fiables en raison des limites sur le plan de la conception de l'étude, des effets néfastes à des doses de toluène inférieures à 375 mg.m⁻³ [51,52].

En plus des effets neurologiques, on rapporte que les travailleurs de sexe féminin exposés à des teneurs de 332 mg.m⁻³ encourrent le risque d'avortement spontané [53].

En vertu de ces études, l'OMS [25] conclue qu'à l'inverse du benzène, le toluène n'exerce pas d'effet hématologique, ne provoque pas de leucémie et n'est pas génotoxique. Ses principaux effets aigus et chroniques sont d'ordre neurologique. La concentration limite à partir de laquelle des effets apparaissent est approximativement de 332 mg.m⁻³ [25].

4- Teneurs atmosphériques :

En milieu naturel non pollué, la teneur atmosphérique en toluène est inférieure à 0.1 µg.m⁻³ [50]. Dans les sites ruraux les teneurs sont en général inférieures à 5 µg.m⁻³ [39].

Dans les centres urbains de plusieurs villes aux USA, Canada et Europe, les teneurs moyennes varient entre 5 et 44 µg m⁻³ avec des maxima pouvant dépasser 165 µg.m⁻³ [55,56].

Comme le toluène se volatilise à partir de l'essence, les concentrations ambiantes les plus élevées, 500 µg.m⁻³ et plus, sont enregistrées dans le voisinage immédiat des stations d'essence [55].

A Alger, lors de prélèvements ponctuels effectués en 1998, les teneurs du toluène en période de forte pollution sur de courtes durées s'élevaient à 38 µg.m⁻³ et 14 µg.m⁻³ respectivement en site urbain et semi urbain [57].

5- Normes et réglementation :

Comme les effets nocifs du toluène n'apparaissent qu'à des teneurs très élevées beaucoup plus importantes que celles rencontrées habituellement dans l'atmosphère, le toluène n'est pas un polluant réglementé. Il existe seulement des recommandations de l'OMS. Sur la base de la concentration limite à partir de laquelle des effets nocifs apparaissent, l'OMS préconise de ne pas dépasser les valeurs suivantes [25] :

- 260 $\mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne sur 7 jours,
- 1 000 $\mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne sur une demi-heure.

Les teneurs en benzène, en toluène et en xylènes dans l'atmosphère urbaine sont très liées puisque ces trois polluants sont issus généralement de la même source. Elles sont de l'ordre du $\mu\text{g m}^{-3}$ et peuvent atteindre quelques dizaines de $\mu\text{g.m}^{-3}$ dans l'air ambiant. Le toluène est le polluant pour lequel on rencontre les concentrations les plus élevées.

II-3- Pollution de l'air par les xylènes :

1- Définition, origine et utilisation :

Les xylènes sont des composés aromatiques monocycliques constitués de deux groupes méthyles liés à un cycle benzénique (formule : $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$). On en connaît trois isomères : l'ortho ou o-xylène (1,2-diméthylbenzène), le méta- ou m- xylène (1,3 diméthylbenzène) et le para-ou p-xylène (1,4 diméthylbenzène). Liquides volatils incolores et transparents et dégageant une odeur aromatique marquée, les xylènes possèdent une pression de vapeur relativement élevée (1100 à 1170 Pa à 25°C) et une solubilité modérée dans l'eau (160 à 220 mg.l^{-1} à 25° C) [40].

La plupart des xylènes sont obtenus par reformage catalytique du pétrole ainsi que comme produits secondaires du craquage des huiles lourdes et brutes. De petites quantités sont obtenues à partir des huiles légères de cokéfaction du charbon [58].

Les xylènes du commerce d'origine pétrolière renferment environ 20 % de l'isomère ortho-, 44 % de l'isomère méta- et 20% de l'isomère para-, ainsi que 15 % d'éthylbenzène. Les xylènes tirés du goudron de houille renferment environ de 10 à 15 % de l'isomère ortho-, de 45 à 70 % de l'isomère méta- et 28% de l'isomère para- ainsi que de 6 à 10 % d'éthylbenzène [59].

Le principal débouché des xylènes purifiés est leur emploi comme antidétonants, comme solvants dans des produits tels que peintures, vernis et autres enduits, préparations antiparasitaires, encres d'impression, colorants, colles et agents d'étanchéité, agents nettoyants, dégraissants et décapants ainsi que comme solvants d'extraction et matières premières dans l'industrie des plastiques.

En outre, les xylènes constituent une composante naturelle du pétrole. On les retrouve ainsi en proportion importante dans les carburants d'essence. L'essence contiendrait environ 10,5 % en poids de xylènes. La plus grande partie de ces xylènes est brûlée au cours du fonctionnement normal du moteur [38,58].

2- Sources d'émission :

L'utilisation très répandue des xylènes comme solvant (principalement dans les peintures et enduits) et leur présence à un taux appréciable dans l'essence, constituent les principales sources de contamination de l'atmosphère. On n'a pas pu retrouver l'inventaire global des émissions de xylènes dans l'atmosphère, mais pour un pays comme le Canada par exemple, on estime les émissions à environ 0.1 million de tonne/an dont 58 % résulteraient des solvants et 39% des moyens de transport. L'industrie pétrolière n'y contribuerait que pour environ 1,7 % [60].

Dans le cas du trafic routier, les émissions unitaires déterminées sur un échantillon moyen de véhicules s'élèvent à 65 mg.Km^{-1} et 24 mg.Km^{-1} respectivement pour le (m+p)-xylène et o-xylène, soit environ 90 mg.Km^{-1} pour le mélange des isomères. Ce facteur d'émission est légèrement plus faible que celui du toluène [42].

3-Effets sur la santé :

L'inhalation est considérée comme la voie la plus importante d'exposition aux xylènes pour la population en général. Dans le cas des xylènes, l'exposition à l'intérieur des locaux joue un rôle important (émanation des peintures, colles, solvants de nettoyage etc.)

Les effets des xylènes sur les êtres humains ont été examinés en laboratoire, chez des volontaires, ainsi que dans des études épidémiologiques de populations professionnellement exposées. Plusieurs cas d'effets neurologiques survenus à la suite d'une exposition aux xylènes ont été signalés [61, 62,63].

Dans plusieurs études épidémiologiques signalées, on rapporte que des travailleurs ont été exposés à des diluants et à des solvants qui renfermaient également de forts pourcentages de benzène ou de toluène ainsi que d'autres composés aromatiques. Il n'est donc pas possible, la plupart du temps, d'attribuer les effets observés aux xylènes seulement.

Des effets transitoires, légèrement négatifs, tels que le déséquilibre du corps au niveau musculaire et la baisse des temps de réaction ainsi que de l'équilibre commandé par le cerveau ont été observés par un groupe de chercheurs chez des volontaires exposés à des concentrations d'au moins $435 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ de xylènes (100 ppm) [64, 65,66].

Toutefois, dans d'autres études effectuées par ces mêmes chercheurs et par d'autres chercheurs, ces effets n'ont pas été observés à des concentrations supérieures [67].

L'effet des xylènes n'étant pas prouvé, même à des concentrations très élevées, l'OMS ne présente aucun rapport sur les xylènes dans ses ouvrages classiques dédiés aux nuisances des polluants organiques et inorganiques de l'atmosphère.

4-Normes et réglementation :

Les xylènes ne sont pas soumis à une réglementation. Les directives de l'OMS préconisent de ne pas dépasser les valeurs suivantes [25] :

- $4\ 400 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ en moyenne sur une demi-heure,
- $4\ 800 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ en moyenne sur 24 jours,
- $870 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ en moyenne annuelle.

5- Teneurs atmosphériques :

Grâce aux techniques chromatographiques, on peut séparer, détecter et mesurer quantitativement les xylènes. L'o-xylène se distingue nettement des autres isomères au cours des analyses chimiques, tandis que les isomères méta et para ne sont généralement pas séparés lors des analyses. En conséquence, les résultats des analyses des échantillons prélevés dans l'environnement donnent habituellement la concentration de l'isomère ortho- et la concentration totale des isomères méta- et para confondus

En milieu naturel et au dessus des océans, les teneurs atmosphériques en xylènes sont inférieures à celles du toluène et du benzène. En milieu rural, l'ensemble des trois isomères accuse des teneurs allant de 0.5 à $1.7 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [60].

En milieu urbain les teneurs en xylènes varient de 1 à 85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; l'o-xylène s'élève environ au 1/3 du (m+p)-xylène [68, 69, 70].

Tout comme pour le benzène et le toluène, les teneurs les plus élevées sont observées au niveau des carrefours, dans les parkings souterrains et particulièrement au niveau des stations services où des maxima de plus de 500 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ sont enregistrés [55].

Les teneurs en benzène, en toluène et en xylènes dans l'atmosphère urbaine sont très liées puisque ces trois polluants sont issus de la même source. Elles sont de l'ordre du $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et peuvent atteindre quelques dizaines de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dans l'air ambiant. Le toluène est le polluant dont on rencontre les concentrations les plus élevées.

II-4- Pollution de l'air par l'éthylbenzène :

L'éthylbenzène est un composé organique aromatique dérivé du benzène, de formule chimique $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}_2\text{H}_5$.

Il est principalement utilisé dans l'industrie pétrochimique comme intermédiaire de synthèse dans la fabrication du styrène, utilisé pour fabriquer le polystyrène.

L'éthylbenzène est également utilisé comme solvant dans les peintures, ainsi que comme additif antidétonant dans l'essence automobile [71].

L'éthylbenzène peut présenter des effets nocifs sur le système nerveux central. Son ingestion peut entraîner une pneumopathie.

Il n'y a pas eu d'études détaillées sur la pollution par l'éthylbenzène et ses effets. Il est souvent présenté avec les xylènes avec lesquels il a montré plusieurs caractéristiques communes.

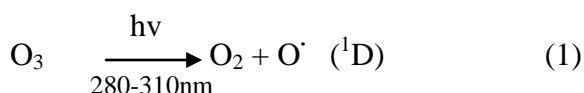
II-5- Réactivités et transformations chimiques des BTEX dans l'atmosphère :

Une fois émis, dilués et dispersés dans l'atmosphère, les COV et parmi eux les BTEX subissent des transformations chimiques et participent à la formation de nouveaux polluants non émis directement, les polluants secondaires.

Parallèlement à leur action directe sur l'être humain, les BTEX participent à la formation, par réaction dans la troposphère avec les radicaux libres, de la pollution photochimique dont l'ozone est le principal indicateur. Ils constituent avec les NOx les précurseurs de l'ozone photochimique [72,73].

Les BTEX ont donc une durée de vie limitée dans l'atmosphère et disparaissent, selon leur réactivité, plus ou moins rapidement. Le temps de séjour dans l'atmosphère des BTEX varie aussi en fonction des latitudes géographiques et en fonction des saisons. C'est en période estivale où l'activité photochimique est la plus intense qu'on devrait rencontrer les plus faibles teneurs [74].

La disparition des BTEX de l'atmosphère résulte principalement de leur réaction avec les radicaux atmosphériques OH· qui se forment selon [75,76] :



(O· (¹D)) : oxygène atomique à l'état excité)

L'oxygène atomique réagit ensuite avec la vapeur d'eau pour donner les radicaux OH· :



On estime ainsi qu'aux latitudes moyennes, la concentration des radicaux OH· est de l'ordre de 1 à 2. 10⁶ cm⁻³ [75], Cette concentration est largement suffisante pour oxyder le CO, le méthane CH₄ et les COV.

1- Mécanisme de réaction du radical OH· :

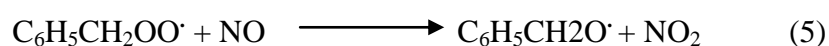
Sur les BTEX, le radical OH· réagit selon deux mécanismes : soit par enlèvement d'un hydrogène en fin de chaîne, soit par réaction d'addition sur le cycle benzénique. Dans le premier cas, on peut obtenir un phénol ou des composés dicarbonylés. Dans le second cas, l'addition donne un composé carbonyle benzénique conjugué (par exemple du benzaldéhyde à partir du toluène). On suppose que la seconde voie est prépondérante dans la réaction entre OH· et le toluène [77,72]

A titre d'exemple nous présentons ci-après la réaction de OH· avec le toluène.

a) Réaction de OH· avec le toluène par enlèvement d'hydrogène [77,72] :



Ce radical alkyl conduit ensuite à un carbonyle par le mécanisme suivant

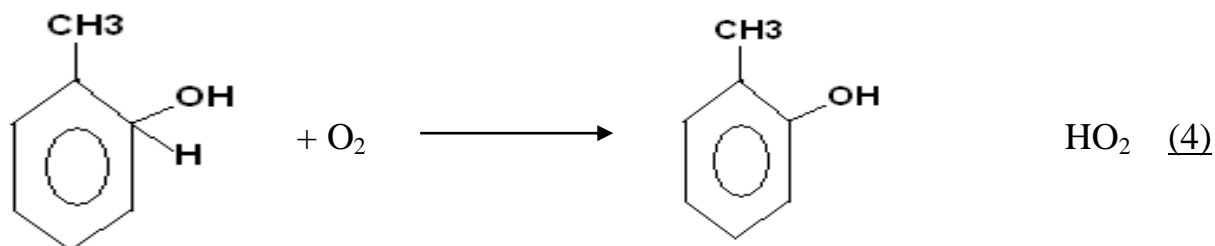
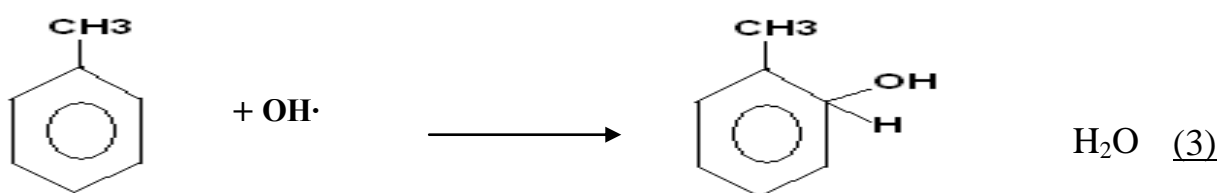


Enfin le radical OH· est régénéré par la réaction :

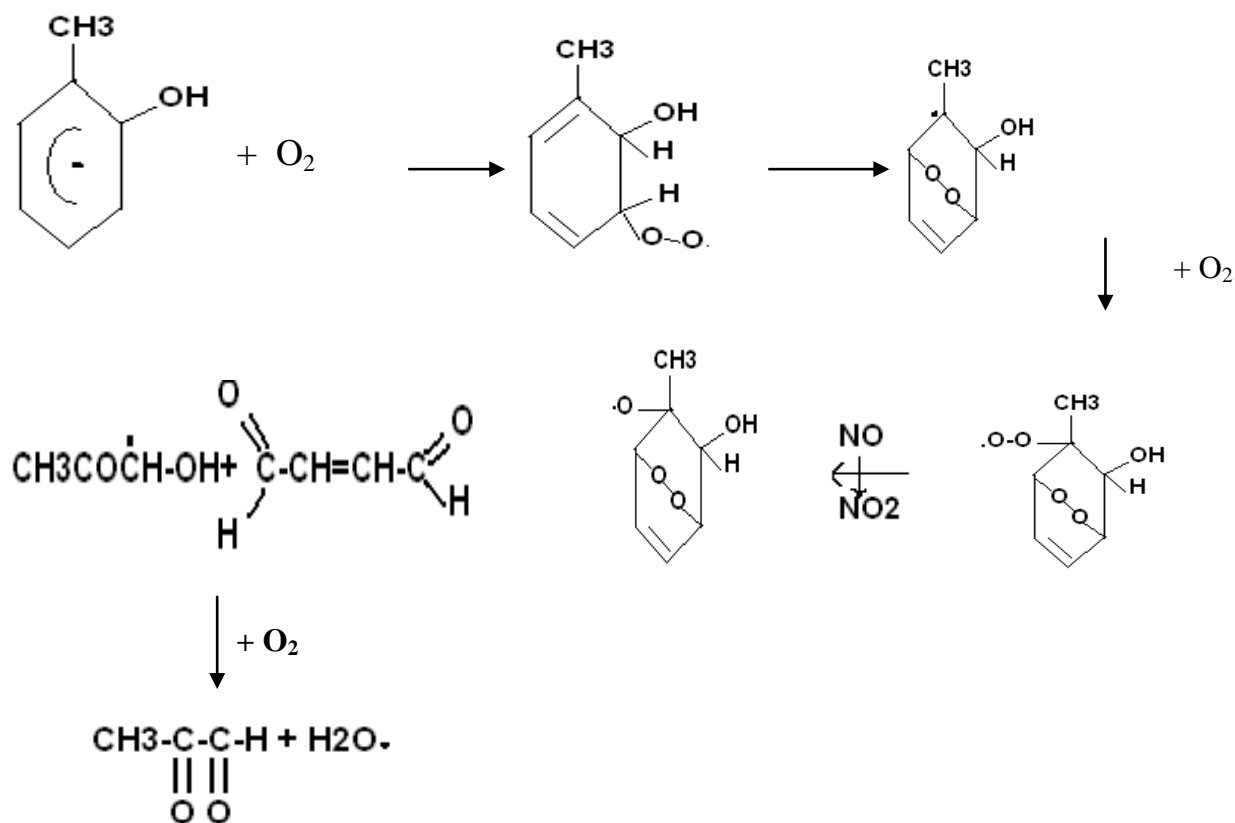


b) Réaction par addition du radical OH· [77,72] :

Cette addition a lieu probablement selon le mécanisme suivant :



L'addition de l'oxygène O₂ peut donner aussi un radical peroxy



Ainsi la photo-oxydation du toluène en présence des NO_x donne du crésol et d'autres composés qui sont eux-mêmes fortement dégradés.

Le principal produit de réaction du benzène avec les radicaux OH[•] est le phénol [79]. De la même manière, la photooxydation des xylènes en présence des NO_x par les radicaux OH[•] donne des tolyaldéhydes, l'aldéhyde pyruvique, des méthylphénols, des méthylbenzylnitrates et un certain nombre d'autres produits de dégradation [77,78,79].

2- Réactivité des BTEX :

Vis-à-vis de la photoxydation, les BTEX n'ont pas la même réactivité, le benzène est le moins réactif et les xylènes sont les plus réactifs.

La réactivité des BTEX avec le radical OH· calculée par rapport à celle du méthane (très peu réactif) est donnée en tableau N ° 3 [80].

Tableau 3 : Réactivité des BTEX, par rapport au méthane, avec le radical OH· [80].

Composés	Réactivité (par rapport au méthane)
Benzène	250
Toluène	1346
p-Xylène	1530
o-Xylène	1750
m-Xylène	2920

Le benzène accuse ainsi la plus faible vitesse de disparition de l'atmosphère.

Les vitesses de réaction des BTEX ont pu être calculées sous diverses latitudes géographiques (Tableau n°4). A Rome, par exemple, la vitesse de réaction du benzène avec les radicaux OH a été estimée à $1.2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [74]. Pour cette ville on a pu estimer les constantes de vitesse relativement au benzène (tableau n°4).

Tableau 4 : vitesse de réaction des composés aromatiques par rapport au benzène [74]

Composé	Vitesse relative de réaction ($\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
benzène	1
toluène	4.8
Ethyl-benzène	6.2
p-xylène	9.2
o-xylène	10
m-xylène	17.5
Triméthyl-benzène	33.0
1,3,5-triméthyl-benzène	52.0

La réactivité des BTEX gouverne par ailleurs leur durée de vie dans l'air ambiant. Dans les latitudes septentrionales et pour les concentrations de radicaux OH· rencontrées habituellement dans les villes, on a évalué à 9 jours la demi-vie du benzène [78].

Selon divers calculs, la durée de vie des xylènes dans la troposphère varie de 0.5 à 1.5 jours.

La durée de vie du toluène est intermédiaire entre celle du benzène et des xylènes [78, 81,82].

Enfin signalons que les BTEX n'interviennent pas dans la destruction de la couche d'ozone à cause de leur durée de vie relativement courte qui ne leur permet pas d'atteindre la stratosphère à 30-40 km d'altitude. Ils ne participent pas aussi aux phénomènes de réchauffement de la planète car ils n'absorbent pas le rayonnement infrarouge dans la fenêtre atmosphérique 7 à 12 μm où sont actifs les gaz à effet de serre comme le CO_2 , le méthane et les CFC.

II-6- Les méthodes de prélèvement et d'analyse des BTX :

1- Mesure manuelle :

L'échantillonnage consiste en un prélèvement dans l'air ambiant et pré concentration des polluants sur un tube garni de charbon actif ; c'est l'adsorption des polluants sur un support solide approprié. Il existe trois types de prélèvement :

a) Prélèvement passif par échantillonneur diffusif :

L'échantillonneur diffusif radial est constitué de deux tubes concentriques :

- un tube externe en polyéthylène microporeux au travers duquel diffusent les composés gazeux
- un tube interne en tamis cylindrique en acier inoxydable rempli de l'adsorbant.

La masse du composé collecté au cours du temps est donnée en fonction des caractéristiques du capteur, du coefficient de diffusion du gaz et de la concentration du composé dans l'atmosphère par la première loi de Fick [83,84,85].

Cette technique que nous avons utilisée dans notre travail sera décrite en détails dans le chapitre suivant.

L'échantillonneur diffusif ne nécessite donc pas l'emploi d'une pompe d'aspiration d'air et son installation sur site n'est pas liée à la disponibilité de courant électrique.

Par cette technique la durée de prélèvement est de l'ordre d'une semaine ou plus. La méthode est souvent utilisée pour balayer un espace très large et accéder à une cartographie de la pollution dans une région donnée. Elle donne entre autre des précisions d'orientations quant au choix des sites pour l'implantation de stations fixes de surveillance en continu de la pollution.

b) Prélèvement dynamique sur charbon actif :

C'est une méthode qui est largement utilisée dans l'étude des BTEX [86]. Elle consiste à aspirer à l'aide d'une pompe à débit constant, l'air à analyser à travers un tube garni de charbon actif. Il y a concentration du polluant sur l'adsorbant.

La teneur dépend du débit d'aspiration et de la durée de prélèvement. Dans les milieux urbains plus ou moins fortement pollués, le débit est de l'ordre de 0.2 l/mn et la durée de prélèvement est de l'ordre de 4 heures. Des débits et durées plus élevées peuvent conduire au point de perçage (saturation du tube) [86].

Que le prélèvement se fasse par voie passive ou dynamique l'échantillon subit, après prélèvement une désorption chimique au laboratoire dans le solvant CS₂. La séparation et l'analyse des BTEX se fait ensuite par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GPG-FID) ou par couplage à la spectroscopie de masse (CPG-MS) [86,87].

L'échantillon prélevé peut aussi être désorbé par voie thermique. Dans ce cas l'appareil CPG doit être muni de l'unité de désorption thermique. Cette dernière méthode jouit d'une grande sensibilité et a l'avantage de ne pas consommer du CS₂ qui est d'usage très délicat [88,89].

c) Prélèvement d'air complet :

Cette technique très répandue aux USA est utilisée lorsqu'on s'intéresse au prélèvement et à l'analyse de l'ensemble des COV de faibles poids moléculaires (C₂-C₈).

Cette méthode américaine (EPA-TO-14-VOCs in ambient air by canister) [90-91] utilise pour le prélèvement des récipients sous forme de bonbonnes métalliques (canister de type

SUMMA) en acier inoxydable d'environ 6 L de volume. Le débit d'admission d'air à la bombonne est de l'ordre de 10 à 15 ml/mn. Après une pré concentration cryogénique à -150°C suivie d'un réchauffement rapide, les gaz sont acheminés par l'intermédiaire d'un gaz vecteur vers l'appareil CPG-MS où aura lieu la séparation et l'analyse des COV et des BTX [89, 90].

2- Mesure automatique :

Pour le prélèvement et dosage quasi-instantané et en continu des BTX ou BTEX, deux types d'appareils ont été récemment développés.

Le premier appareil est en fait un appareil CPG spécifique aux BTEX; après prélèvement, il y a séparation des différents composés et détection par ionisation de flamme. L'échantillonnage se fait automatiquement en continu avec des cycles de mesure de 15 ou 30 minutes.

Le deuxième appareil qui est dédié à l'analyse en continu des BTX dans l'air ambiant est basé sur le principe de l'excitation électronique en UV des composés aromatiques. Les composés benzène, toluène et xylène ont des spectres d'adsorption UV caractéristiques qui permettent leur mesure par spectrophotométrie UV. Les BTX sont concentrés sur adsorbant puis désorbés thermiquement. Cet appareil ne diffère en fait du premier que par le système de détection.

III- METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

III-1- Tubes échantillonneurs passifs :

Les teneurs en benzène sur la zone d'Alger ont été mesurées à l'aide de tubes échantillonneurs passifs, commercialisés sous la marque RADIELLO. Une fois installés, ils collectent spécifiquement les polluants présents dans l'air ambiant et permettent ainsi d'estimer une concentration moyenne sur la durée d'exposition (photo 1).



Photo 1 : Tubes à diffusion « Radiello » avec la boîte de protection installée sur site

Le principe de l'échantillonnage passif repose sur la collecte de polluants gazeux par diffusion à travers une membrane. La masse de composés collectée est liée mathématiquement au gradient de concentration dans la zone de diffusion (1ère loi de Fick equation1) [83, 84,85].

$$\frac{dm}{dt} = D \times S \times \frac{dC}{dl} \quad (eq.1)$$

- C** : concentration de l'espèce moléculaire dans l'air (en mol.cm⁻³)
m : quantité de matière (en mol) diffusant à travers la section **S** (en cm²) sur une longueur **l** (en cm) durant un temps **t** (en s), soit la quantité de matière captée.
D : coefficient de diffusion moléculaire caractéristique du composé (en mol.cm⁻³)

La méthode d'échantillonnage par diffusion passive retenue pour cette étude est complémentaire aux autres outils de surveillance utilisés, comme les stations fixes de mesures ou les laboratoires mobiles.

Si ces derniers permettent de réaliser des mesures locales de la pollution en continu, l'utilisation des tubes passifs permet de réaliser des mesures sur des zones beaucoup plus vastes et de déterminer, avec un coût acceptable, la distribution spatiale des polluants à l'immission.

Les résultats obtenus permettent d'estimer une concentration moyenne sur une période de 1 à 3 semaines, selon la durée d'exposition.

La technique par diffusion passive est donc un moyen simple, rapide et peu onéreux d'estimer une tendance générale de la qualité de l'air ambiant.

III-2- Tubes à diffusion « Radiello » :

Les capteurs passifs destinés à la mesure des BTEX sont des capteurs de marque Radiello [92].

Les tubes « Radiello » présentent l'originalité d'offrir une diffusion radiale, ce qui permet d'obtenir une surface de diffusion plus grande. Selon le fabricant, cette technologie assure une meilleure sensibilité des mesures grâce à une augmentation de la masse captée.

Les tubes Radiello sont ainsi constitués par 2 tubes cylindriques concentriques :

- Un tube externe en polyéthylène micro poreux, appelé corps diffusif, à travers lequel diffusent les composés gazeux. Ce tube externe fait office de filtre en arrêtant les poussières et autres impuretés (figure 3).
- Un tube interne (cartouche) réalisé avec un tamis cylindrique en acier inoxydable revêtu d'un support imprégné (absorption), ou rempli d'un adsorbant selon les caractéristiques du ou des composés à analyser (figure 3).

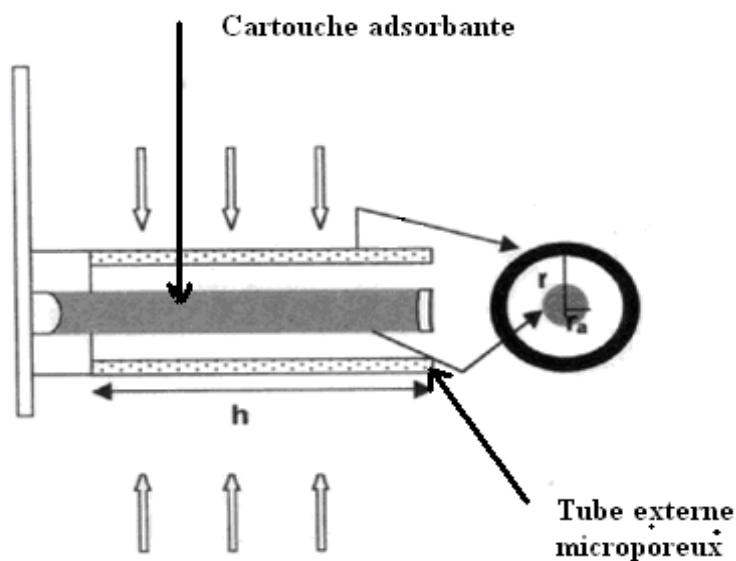


Figure 3 : Coupe d'un tube « Radiello »

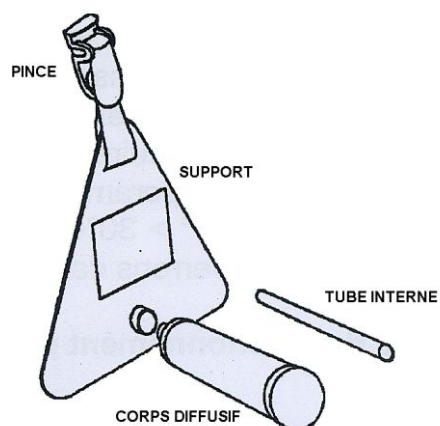


Figure 4 : Eléments d'un tube échantillonneur passif

Le tube Radiello pour BTEX est constitué d'un corps diffusif jaune en polyéthylène, dans lequel une cartouche adsorbante à base de Carbograph 4 est insérée (figure 4). Les caractéristiques du tube radiello sont présentées sur la figure 5. Les polluants visés diffusent à travers la membrane poreuse jusqu'à la cartouche sur laquelle ils s'adsorbent. Le corps diffusif, ou membrane poreuse, permet de réguler la diffusion du polluant dans l'échantillonneur. Il permet, de plus, d'atténuer l'effet du vent sur l'échantillonnage. L'ensemble est vissé sur un socle, qui peut être fixé à un support, idéal pour l'exposition dans l'air ambiant.

La cartouche exposée est ensuite désorbée chimiquement avec le CS₂ et analysée par chromatographie en phase gazeuse.

Le tube Radiello est un échantillonneur passif à diffusion radiale. Sa surface de contact avec l'air est de 360° sur toute la longueur de l'échantillonneur. On obtient ainsi une surface bien plus importante que pour les échantillonneurs à diffusion de type axial. Les durées d'exposition peuvent ainsi être plus courtes.

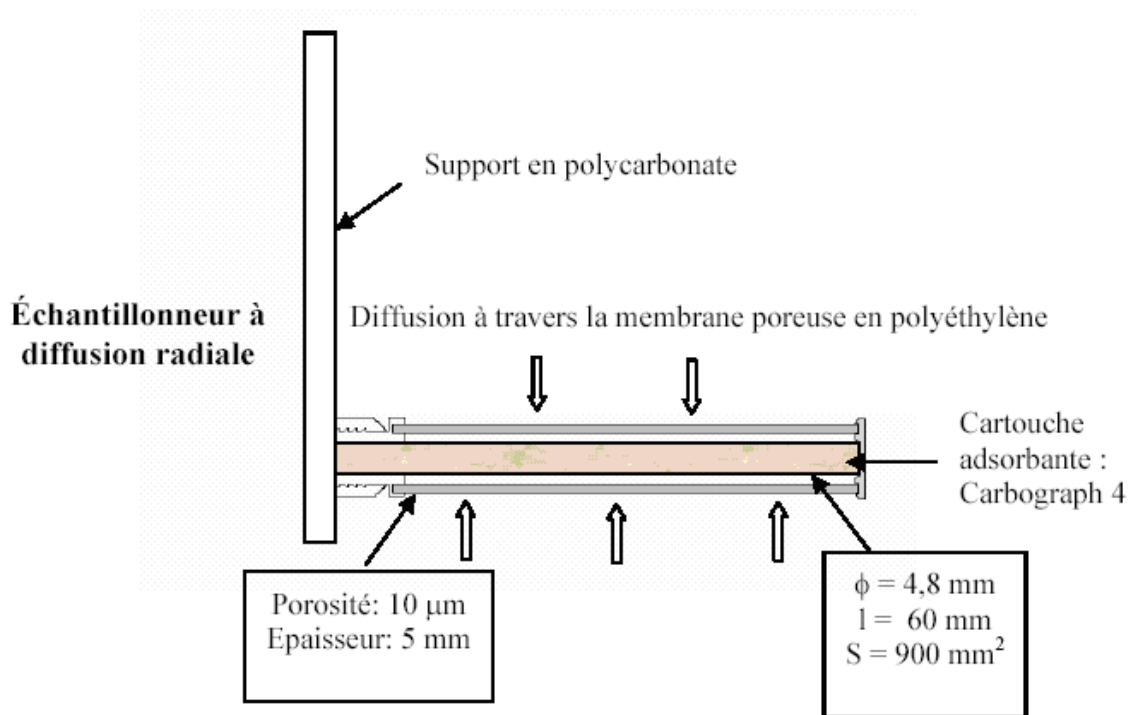


Figure 5 : caractéristiques du tube passif Radiello

Les débits d'échantillonnage des BTEX peuvent être évalués par l'intégration de la première loi de Fick (équation 1) [83,84,85], en reliant la masse adsorbée par le tube passif au gradient de concentration qui s'établit naturellement dans le tube, à la durée d'exposition et à la surface d'échantillonnage exposée aux polluants.

Dans le cas d'un tube Radiello, le terme S de l'équation 1 est la surface de la cartouche cylindrique de longueur h et de rayon r . Cette équation devient alors:

$$\frac{dm}{dt} = D 2\pi r h \frac{dC}{dr} \quad (\text{eq.2})$$

Pour le tube Radiello, les débits d'échantillonnage sont [85] :

Tableau 5 : valeurs des débits d'échantillonnage [85]

composé	Débit d'échantillonnage (cm ³ .min ⁻¹)
Benzène	27,8
Toluène	30,0
Ethylbenzène	25,5
m+p-xylène	26,6
o-xylène	24,6

L'échantillonneur diffusif est une boîte fermée, d'habitude cylindrique, dont une des deux surfaces planes est "transparente" aux molécules gazeuses alors que l'autre les adsorbe. On appelle *diffusive* la première surface et *adsorbante* la deuxième (respectivement *S* et *A* en figure 6).

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 viennent d'être piégés par *A* suivant la loi de la diffusion

$$\frac{dm}{dt} = D S \frac{dC}{dl} \quad (eq.1)$$

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 diffusante et C_0 est celle à la surface adsorbante,

l'intégrale de (1) est

$$\frac{m}{t} = D \frac{S}{l} (C - C_0) \quad (eq.3)$$

qui va devenir

$$\frac{m}{t C} = D \frac{S}{l} = Q \quad \text{ou} \quad C = \frac{m}{t Q} \quad (eq.4)$$

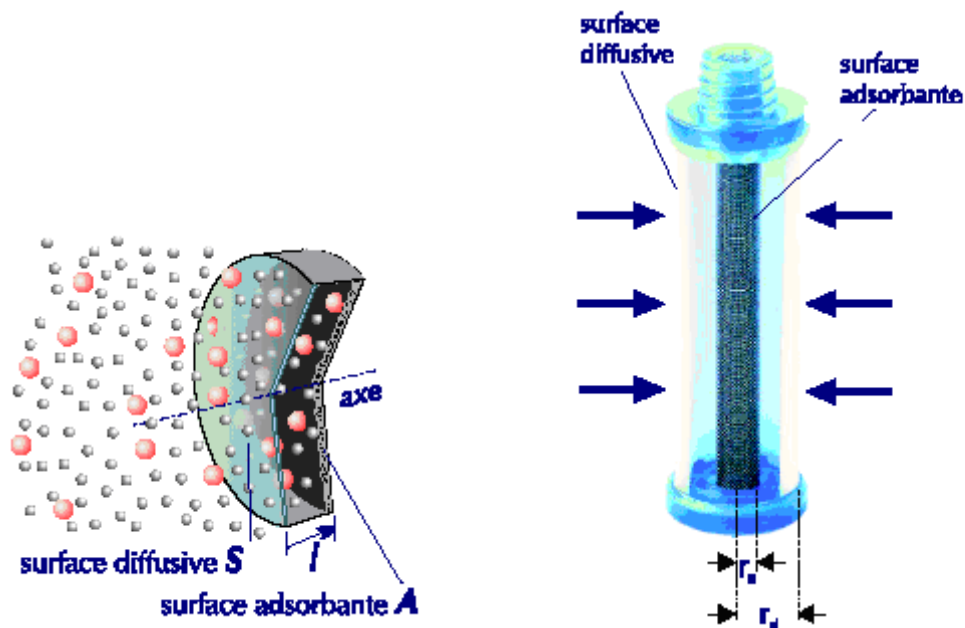


Figure 6 : Surfaces diffusives et adsorbantes

Si la concentration à la surface adsorbante est égale ou très proche à 0.

Q est le débit de piégeage, dont les dimensions sont justement celles d'un flux (en exprimant 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 bien simplement par la mesure de la masse piégée et du temps d'exposition.

Les valeurs de Q ont été mesurées à 25 °C (298 K) et 1013 hPa; donc, on devra les corriger par rapport aux conditions réelles de piégeage.

Bien qu'il y ait des cartouches qui absorbent beaucoup d'eau lors de l'exposition en air très humide, en général l'humidité n'a pas d'effets sur le piégeage par radiello.

La cartouche Radiello code 130 est un tube filet acier inoxydable de 5,8 mm de diamètre à la maille 100 mesh, rempli avec 530 ± 30 mg de charbon actif 35-50 mesh.

On calcule la valeur moyenne de la concentration C en $\mu\text{g.m}^{-3}$ durant la période d'exposition par :

$$C [\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] = \frac{m [\mu\text{g}]}{Q_K [\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}] \cdot t [\text{min}]} \cdot 1.000.000 \quad (\text{eq. 5})$$

Où:

m = masse collectée en μg

t = temps d'exposition en minutes

Q_K = débit de piégeage en $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$

Le débit de piégeage à 25° C et 1013 hPa est donné par le fabricant des tubes Radiello ; il est de :

- Benzène :	80 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$
- Ethylbenzène :	68 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$
- Toluène :	74 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$
- m Xylène :	70 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$
- o Xylène :	65 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$
- p Xylène :	70 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$

III-3- Analyse des échantillons :

Les composés organiques volatils piégés par adsorption, sont désorbés par le disulfure de carbone et sont analysés par la chromatographie en phase gazeuse (CPG) muni d'un détecteur à ionisation de flamme (FID).

1- Désorption :

Des pipettes ou des doseurs volumétriques étalonnés en classe A sont utilisés. Sans enlever la cartouche de son tube en verre, on y introduit 2 ml de CS_2 . Après agitation durant une trentaine de minutes, l'échantillon désorbé est prêt à l'analyse. Le désorbant est de marque Fluka. C'est la seule marque de CS_2 qui ne contient pas de traces de benzène.

Outre son pouvoir extractant, ce solvant présente l'avantage, par rapport à des solvants classiques, d'être élué rapidement en chromatographie et, par conséquent, permet de minimiser fortement le risque de marquer les pics chromatographiques des BTEX. Par contre sa volatilité (point d'ébullition 46°C) son caractère inflammable et sa toxicité font qu'il est d'utilisation délicate.

2- Analyse par CPG :

L'appareil CPG utilisé est de type Shimadzu GC-17A doté d'un détecteur FID.

Après plusieurs essais d'optimisation sur des solutions étalon, nous avons retenu les conditions opératoires suivantes :

La colonne utilisée est une colonne capillaire de type Supelco BP5 de diamètre de 0.53 mm et de 15 m de longueur. Le volume d'injection est de 1 µl en mode split avec un rapport de split de 100/1; le gaz vecteur est le N₂ à 30 ml.min⁻¹ (75 KPa). La température de l'injecteur est de 250° C, celle du four est de 80° C et celle du détecteur est de 250° C.

Les étalons BTEX (Supelco) sont pure.

Chaque mesure est répétée trois fois et la teneur moyenne est enregistrée.

La quantification a été effectuée par étalonnage externe. Les courbes d'étalonnage sont données en annexe 1.

III-4- Zone d'étude :

La présente campagne de mesures effectuée sur la zone d'Alger Est s'inscrit dans le cadre d'un projet d'étude couvrant le suivi de la qualité de l'air au niveau de l'agglomération d'Alger. Douze communes ont été retenues pour cette étude.

1- Situation géographique et données démographiques :

Le tableau n° 6 détaille les populations et les densités de population des différentes communes concernées par l'échantillonnage des BTEX.

La figure n° 7 illustre les communes étudiées.

Tableau 6 : Données démographiques sur la zone d'étude (source ONS)

	<i>commune</i>	<i>Superficie en Km²</i>	<i>Population au 01.01.2004</i>	<i>Densité (Hab/Km²)</i>
1	<i>Kouba</i>	10,05	111.709	11.115
2	<i>Gué de Constantine</i>	14,54	92.940	6.392
3	<i>Bourouba</i>	3,39	80.988	23.890
4	<i>Bachedjerah</i>	3,00	93.965	31.321
5	<i>Megharia</i>	1,57	32.022	20.396
6	<i>Hussein Dey</i>	4,26	52.295	12.275
7	<i>Mohammadia</i>	7,99	45.142	5.649
8	<i>El-Harrach</i>	9,42	50.671	5.379
9	<i>Oued Smar</i>	8,15	22.846	2.803
10	<i>Bab Ezzouar</i>	8,23	100.388	12.197
11	<i>Bordj El Kiffan</i>	21,70	112.896	5.202
12	<i>Dar El Beida</i>	33,29	50.690	1.522

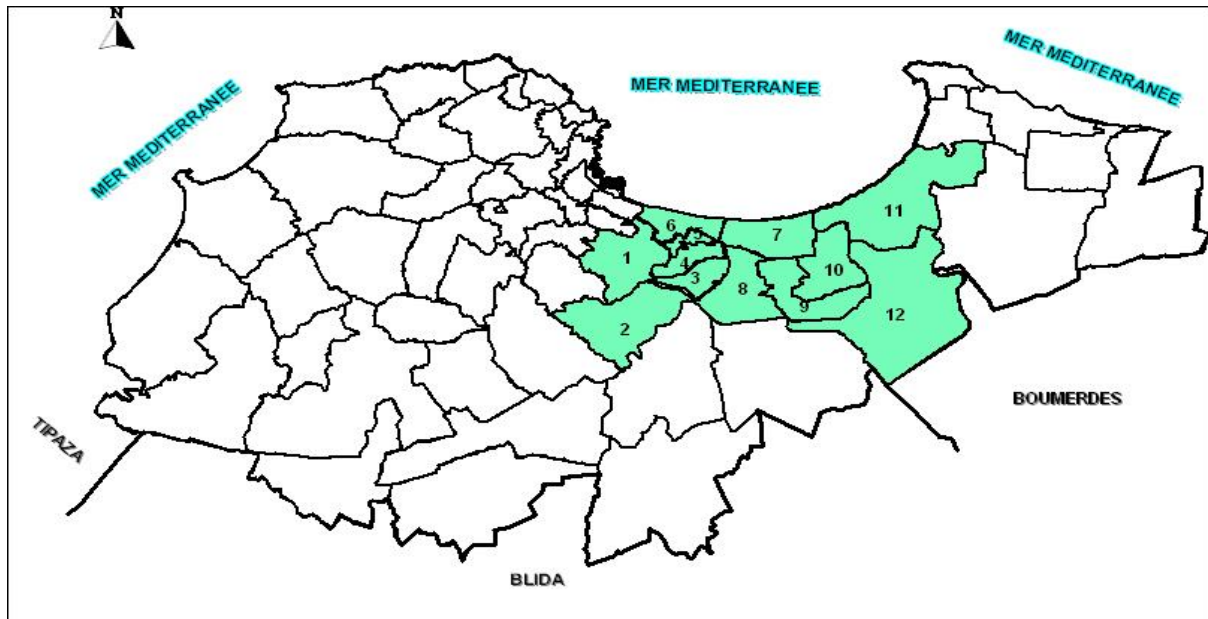


Figure n°7 : zone d'étude

■ Communes où sont implantés des points de mesure

2 - Organisation de la campagne de mesure :

Choix des sites :

Cette étude devrait être l'occasion de cerner l'impact des activités urbaines, industrielles et du trafic routier sur la qualité de l'air. Ainsi les capteurs ont été placés à proximité des sites susceptibles de rejeter dans l'atmosphère les COV à savoir les usines pharmaceutiques et les établissements utilisant des solvants, au bord des axes routiers et dans les sites urbains.

A noter qu'au niveau de la zone d'Alger, c'est surtout l'étude de l'impact du trafic automobile sur la qualité de l'air qui est importante. A cet effet nous avons retenu deux types de site :

- Sites de **proximité automobile** (appelés aussi stations trafic)
- Sites **urbain** qui, n'étant pas sous influence directe d'une source de pollution, permettent de caractériser l'ambiance de pollution urbaine de fond et les niveaux de pollution auxquels sont exposés les citoyens résidents.

Sites de proximité automobile

Après avoir dressé un inventaire des principaux axes de circulation, **neuf sites** de proximité automobile (notés P), représentatifs de l'intensité du trafic routier dans la zone étudiée ont été retenus.

Sites de pollution urbaine de fond

Afin de faciliter les études ultérieures de cartographie, nous avons sélectionné **trente et un** sites de fond urbain (notés F). Il n'existe pas, sur le plan national, de protocoles harmonisés concernant la construction de maillages, le positionnement et le nombre des points sur la zone d'étude.

Pour déterminer l'emplacement de ces capteurs, un maillage a été élaboré à partir de la distribution des densités de population sur l'agglomération. En effet, l'objectif est d'obtenir une visualisation spatiale de la pollution et ainsi rendre compte de l'exposition moyenne de la population. En ce sens, il apparaît logique qu'à une densité de population élevée correspondra une maille resserrée, et inversement, qu'à une densité de population faible, corresponde une maille élargie.

Dans le choix des sites ou postes de mesure, le positionnement des tubes doit répondre à certains critères afin d'optimiser l'information contenue dans la mesure :

- 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 doivent être installés à 2-3 mètres de hauteur pour éviter d'éventuels actes de vandalisme.

Les supports utilisés sont des poteaux électriques et/ou téléphoniques, des lampadaires, des feux de signalisation, etc.

- Les sites trafic doivent se situer à une distance maximum de 5 mètres d'une infrastructure routière,
- Les tubes dits de fond doivent être placés à une distance minimum de 50 mètres de toute source directe de pollution.

Durant cette campagne de mesure qui s'est étalé du 26 novembre au 21 décembre 2004, 40 tubes d'échantillonneurs passifs BTEX ont été installés.

Sur l'ensemble de ces échantillonneurs Radiello installés, 4 tubes ont subi des altérations et étaient inexploitable.

Sur le tableau n° 7 nous présentons la localisation exacte des points de mesures ainsi que les supports de fixation. Ces sites de mesure sont également illustrés sur la carte géo référencié présenté en forma A3.

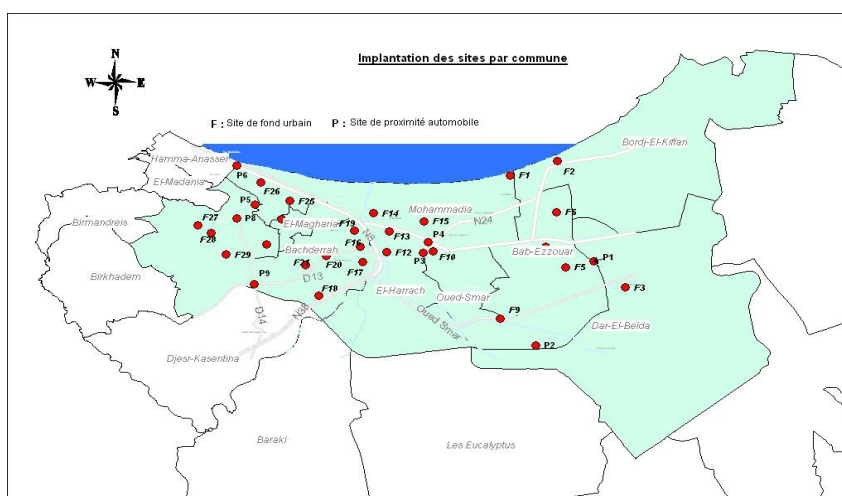


Tableau n° 7 : Emplacement des tubes échantillonneurs

<i>Référence tube</i>	<i>support</i>	<i>commune</i>	<i>localisation</i>
F1	Poteau en béton	BORDJ EL KIFFAN	Clinique Ennour - Lido
F2	lampadaire		placette du centre ville
F3	lampadaire	DAR EL BEIDA	Placette du centre ville
P1	Poteau en béton		Caserne des pompiers
F4	panneau	BAB EZZOUAR	Cite universitaire cube 3
F5	lampadaire		Maison de jeunes 5 juillet
F6	Poteau en béton		CEM -Sorecal
F7	lampadaire	OUED SMAR	APC Beaulieu
F8	lampadaire		Mosquée Sidi Marek
F9	Poteau électrique		Mosquée de la gare
P2	Poteau béton		Centrale des Hôpitaux -zone industrielle
P3	lampadaire		Impôts - Hacem Badi
F10	Poteau inutilisé	EL HARRACH	ENP - cour intérieur
F11	lampadaire		Daïra - école
P4	Poteau inutilisé		Intersection -5 maisons
F12	lampadaire		Commissariat
F13	lampadaire	MOHAMMADIA	Bellevue
F14	Poteau en béton		Stade - Lavigerie
F15	Poteau inutilisé		Bibliothèque
F16	Poteau inutilisé	BOUROUBA	Djenan mabrouk
F17	lampadaire		école Hmitouche -cité Plm
F18	lampadaire		école Mouloud Feraoun Naimi -la Montagne
F19	Poteau inutilisé		CEM Dhaikh Daimi- Diar Djemaa
F20	Poteau inutilisé	BACH DJERAH	Polyclinique
F21	Poteau inutilisé		lycée mohamed ben hadad
F22	lampadaire	MEGHARIA	Université -Caroubier
F23	lampadaire		Polyclinique Leveillers
F25	lampadaire	HUSSEIN DEY	hôpital parnet (cour interieur)
F26	Poteau électrique		Sûreté Daira
P6	Poteau électrique		Pont autoroute -La Farge
P9	Poteau en béton	GUE DE CONSTANTINE	4 chemins
F31	Poteau inutilisé		Cité hayat
F24	lampadaire	KOUBA	Cité mer et soleil
P5	Poteau en béton		Impôts- calvaire
F27	Poteau en béton		ENS
F28	Poteau inutilisé		Sûreté- La Croix
P7	Poteau électrique		la poste -4 chemins
F29	lampadaire		Sûreté -Jolie Vue
P8	Poteau électrique		st Michel -4 chemins
F30	Poteau inutilisé		Cimetière Ben Omar

III-5- Données météorologiques :

1- Température et humidité :

Les données de températures et d'humidité ont été fournies par la station météorologique de Dar-El-Beida.

Le tableau 8 résume les données météorologiques enregistrées durant la campagne de mesure (26/11/04 au 21/12/04) : la température moyenne en °C, l'humidité moyenne (Evaporation en mm et 1/10) et la pluviométrie (nombre de jour de pluie)

Tableau n°8 : Donnés météorologiques sur la zone d'Alger (station météo de Dar-El-Beida)

	26/11/04 au 21/12/04
Température moyenne (°C)	12.5
Pluviométrie (Evaporation en mm et 1/10)	14.6
Pluviométrie (nb. de jour de pluie)	10

Le tableau 9 nous donne les températures de l'air sous abri en °C et dixièmes durant la campagne de mesure.

Tableau n° 9 : Température de l'air sous abri en degrés Celsius

DATES	TEMPERATURE DE L'AIR SOUS ABRI EN °C										
	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h	Moyenne	Minimum.	Maximum
26/12/04	6,6	6,0	5,2	12,5	18,6	17,9	12,6	8,8	11,02	4,0	19,4
27/12/04	6,6	5,1	4,6	12,0	21,8	20,0	13,7	8,6	11,55	3,6	22,9
28/12/04	7,0	6,1	4,9	12,6	22,0	20,6	13,5	9,0	11,96	4,2	24,0
29/12/04	14,2	10,5	9,5	13,8	20,9	19,0	14,0	10,5	14,05	7,8	21,5
30/12/04	9,9	10,0	10,5	12,7	18,5	16,5	15,6	17,2	13,86	8,7	19,0
01/01/05	18,3	18,0	18,1	17,5	23,5	25,3	18,5	15,6	19,35	15,4	26,2
02/01/05	14,8	14,2	12,2	17,0	23,5	20,0	16,5	14,5	16,59	10,8	24,5
03/01/05	13,6	9,8	8,0	13,8	23,0	25,8	16,0	15,0	15,63	6,6	26,0
04/01/05	11,7	9,0	7,5	15,0	20,7	19,6	15,1	15,4	14,25	5,7	21,4
05/01/05	13,5	12,5	9,9	13,0	18,2	16,7	12,5	12,2	13,56	8,7	18,8
06/01/05	12,6	12,6	12,5	12,8	15,3	14,8	13,2	12,0	13,22	11,9	16,1
07/01/05	10,4	10,5	10,5	12,9	17,0	15,2	12,0	9,0	12,19	8,4	17,5
08/01/05	7,0	8,5	6,0	12,0	17,0	15,1	12,2	11,6	11,18	4,7	17,2
09/01/05	10,6	10,9	10,0	11,5	12,4	13,0	12,4	12,6	11,67	8,7	13,6
10/01/05	12,5	12,4	13,1	13,4	18,0	16,1	12,4	10,4	13,54	11,6	18,2
11/01/05	8,5	8,4	6,5	11,6	18,4	16,0	12,0	9,0	11,30	5,7	19,4
12/01/05	7,0	5,3	4,4	11,0	19,0	17,9	12,6	10,3	10,94	3,8	20,4
13/01/05	6,4	5,4	4,4	10,0	19,7	17,6	13,4	10,5	10,93	3,5	20,4
14/01/05	8,0	5,7	5,5	9,3	19,0	18,3	13,0	13,4	11,52	4,8	20,7
15/01/05	13,2	15,0	14,0	15,7	16,8	17,4	15,8	13,9	15,23	11,5	17,5
16/01/05	14,4	12,3	12,0	12,8	15,7	14,4	13,6	12,5	13,46	10,4	16,0
17/01/05	12,7	11,6	12,2	12,8	16,0	16,3	13,5	12,5	13,45	11,1	18,2
18/01/05	10,6	10,1	10,5	15,0	18,0	16,6	13,5	11,5	13,22	9,0	18,2
19/01/05	10,4	10,5	10,0	13,8	19,6	20,5	14,0	13,2	14,00	8,8	21,2

La figure 8 nous donne l'évaluation de la température durant la campagne de mesure.

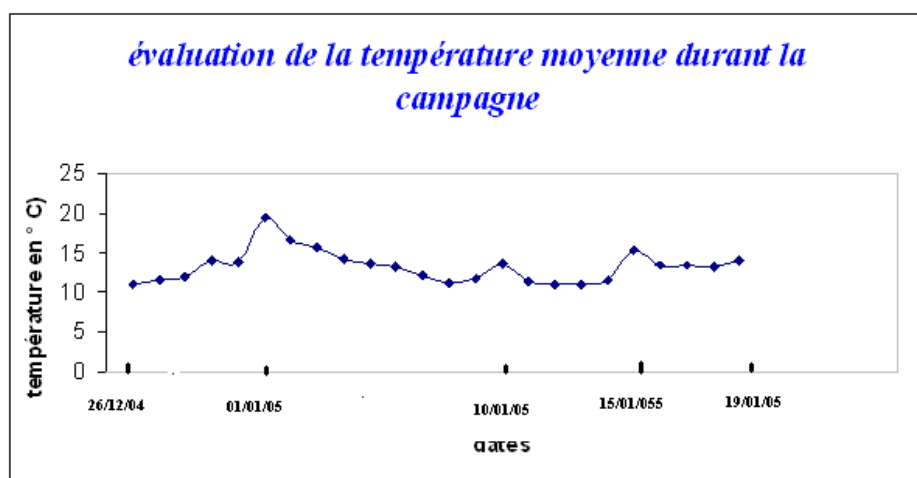


Figure n° 8 : évaluation de la température moyenne durant la campagne de mesure

Le tableau 9 résume les précipitations ainsi que l'évaporation en mm durant la campagne de mesure.

Tableau n° 9 : Précipitations

DATES	PRECIPITATIONS			
	HAUTEUR en millimètres			Evaporation en mm
	du matin au soir	du soir au lendemain matin	Total des 24 h.	
26/12/04	-	-	-	0,7
27/12/04	-	-	-	1,5
28/12/04	-	-	-	3,8
29/12/04	-	-	-	1,5
30/12/04	0,0	-	0,0	2,8
01/01/05	-	-	-	3,8
02/01/05	-	-	-	1,1
03/01/05	-	-	-	1,9
04/01/05	-	1,1	1,1	1,8
05/01/05	-	16,1	16,1	0,5
06/01/05	1,9	0,0	1,9	0,7
07/01/05	-	-	-	0,7
08/01/05	-	-	-	0,6
09/01/05	127	8,0	20,7	0,6
10/01/05	8,3	0,0	8,3	0,3
11/01/05	-	-	-	0,4
12/01/05	-	-	-	1,4
13/01/05	-	-	-	1,1
14/01/05	-	-	-	2,4
15/01/05	-	0,2	0,2	2,3
16/01/05	4,5	0,5	5,0	0,9
17/01/05	0,6	-	0,6	1,4
18/01/05	0,9	-	0,9	1,4
19/01/05	-	0,3	0,3	1,5

2- Etude des vents :

Le tableau 10 donne la direction en lettres de la rose des vents et vitesse du vent en mètre par seconde

Tableau n° 10 : Direction de la rose et vitesse du vent en mètre par seconde

DATES	Vitesse moyenne en $m.s^{-1}$	Vent maximal instantané		
		Direction (degrès)	Vitesse ($m.s^{-1}$)	Heure
26/12/04	02	34	5	13 h 51
27/12/04	06	34	7	13 h 58
28/12/04	14	15	8	12 h 58
29/12/04	2,0	33	8	13 h 59
30/12/04	1,5	22	8	23 h 54
01/01/05	5,6	30	15	16 h 18
02/01/05	1,9	02	8	14 h 00
03/01/05	1,1	14	10	09 h 34
04/01/05	1,2	24	7	21 h 43
05/01/05	0,5	36	5	14 h 45
06/01/05	2,1	24	7	15 h 00
07/01/05	3,3	24	9	12 h 07
08/01/05	0,0	25	6	16 h 31
09/01/05	4,5	26	11	13 h 04
10/01/05	4,4	24	10	01 h 13
11/01/05	0,5	02	5	13 h 59
12/01/05	1,6	05	7	14 h 37
13/01/05	0,6	06	6	14 h 07
14/01/05	2,1	18	9	23 h 05
15/01/05	3,4	18	12	01 h 30
16/01/05	1,9	26	7	13 h 58
17/01/05	4,9	30	10	13 h 48
18/01/05	3,8	28	11	11 h 00
19/01/05	3,1	26	9	12 h 54

Ainsi la période d'étude s'est caractérisée par :

- une température journalière moyenne de l'ordre de 12,5°C avec de faibles fluctuations.
- Un vent faible de direction Est ;
- Une faible pluviométrie.

Il y a donc absence de situation exceptionnelle qui aurait pu perturber l'échantillonnage.

IV- RESULTATS ET DISCUSSION

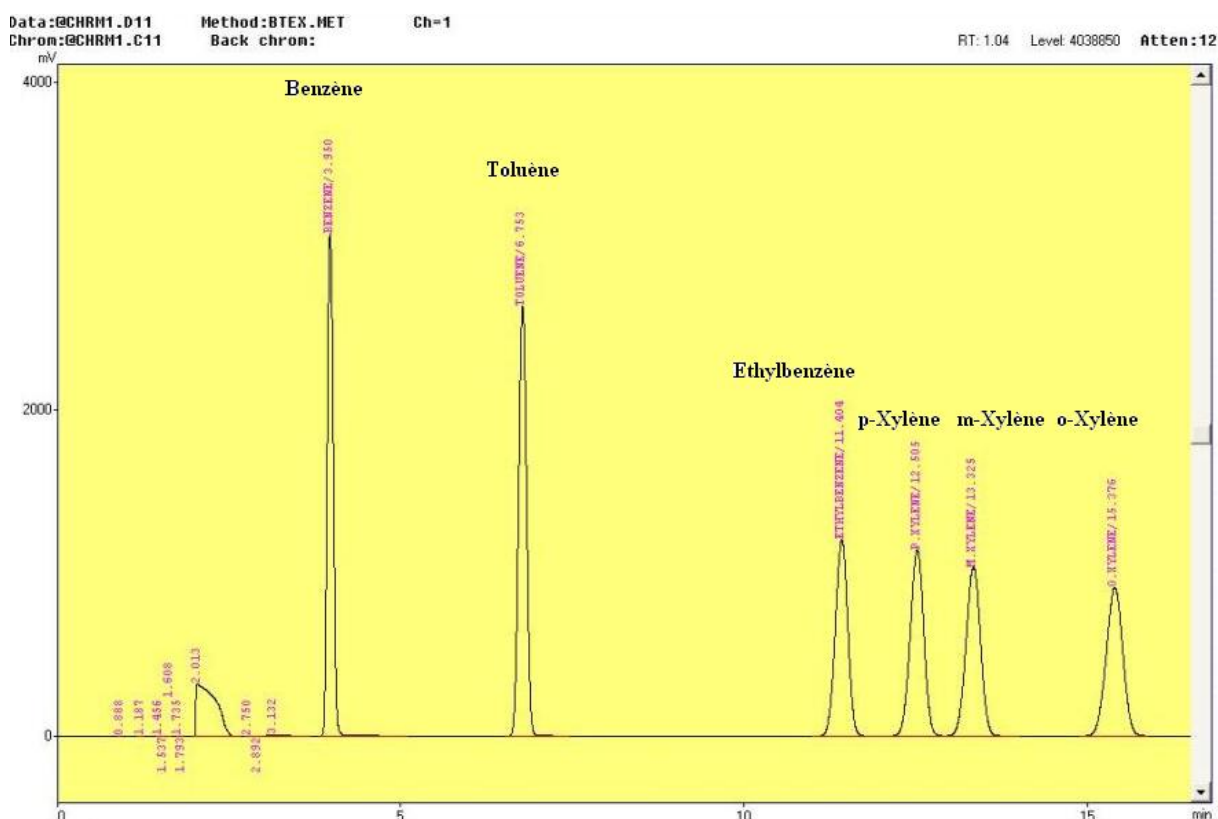
IV-1- Teneurs en BTEX :

1- Temps de rétention des BTEX :

L'analyse des étalons des différents BTEX a permis de déterminer les temps de rétention. Nous illustrons en figure n° 9 un chromatogramme des BTEX dissous dans le CS₂ à une concentration de 1µl.ml⁻¹ les temps de rétention correspondant sont donnés dans le tableau n° 11.

Tableau n° 11 : temps de rétention des BTEX

	<i>benzène</i>	<i>toluène</i>	<i>éthylbenzène</i>	<i>p-xylène</i>	<i>m-xylène</i>	<i>o-xylène</i>
<i>Temps de rétention (mn)</i>	4	6.8	11.7	12.6	13	15.2



A signaler ici que l'optimisation des conditions opératoires et le choix approprié de la colonne chromatographique a permis d'atteindre une bonne séparation des isomères méta- et para xylènes. Habituellement, ces deux isomères qu'on n'arrive pas à séparer facilement, sont comptabilisés ensemble.

2- Teneurs atmosphériques en BTEX :

Nous représentons en figures n° 10 et figure n° 11 à titre d'illustration les chromatogrammes obtenus pour les échantillons prélevés en site de fond urbain et en site de proximité automobile respectivement.

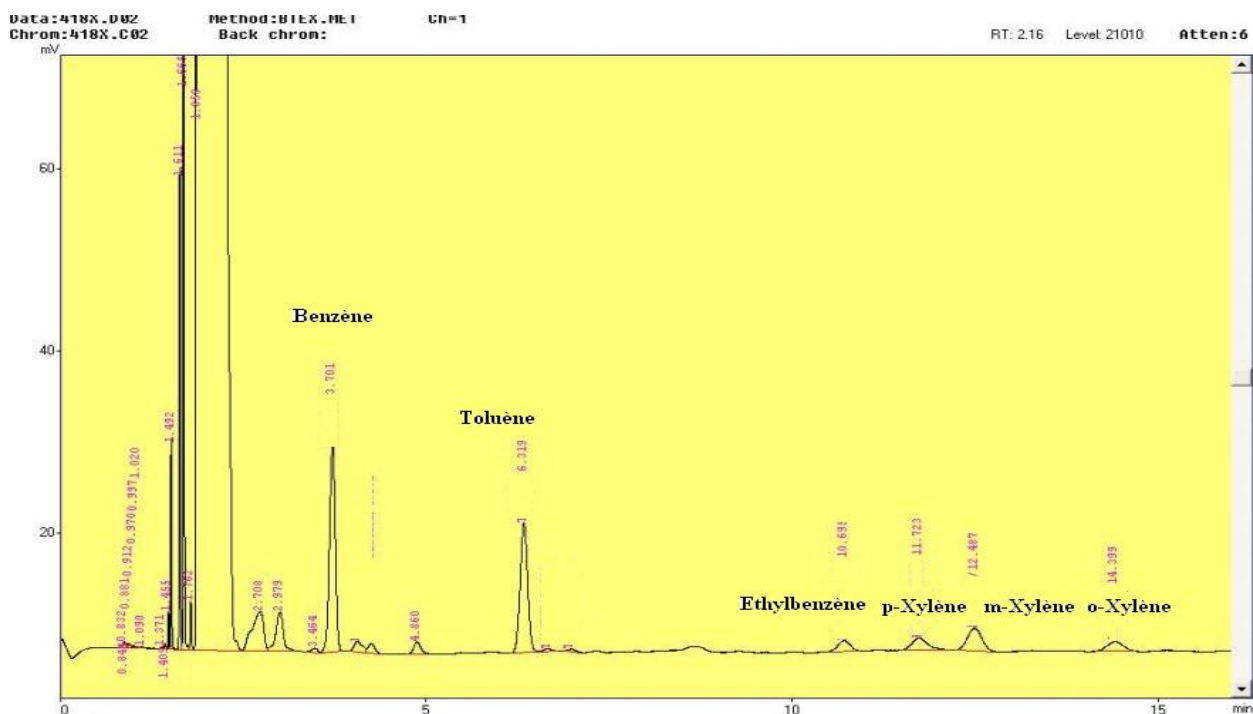


Figure n° 10: chromatogramme CPG des BTEX mesurés en site urbain à Bordj-el-kiffane (site F2)

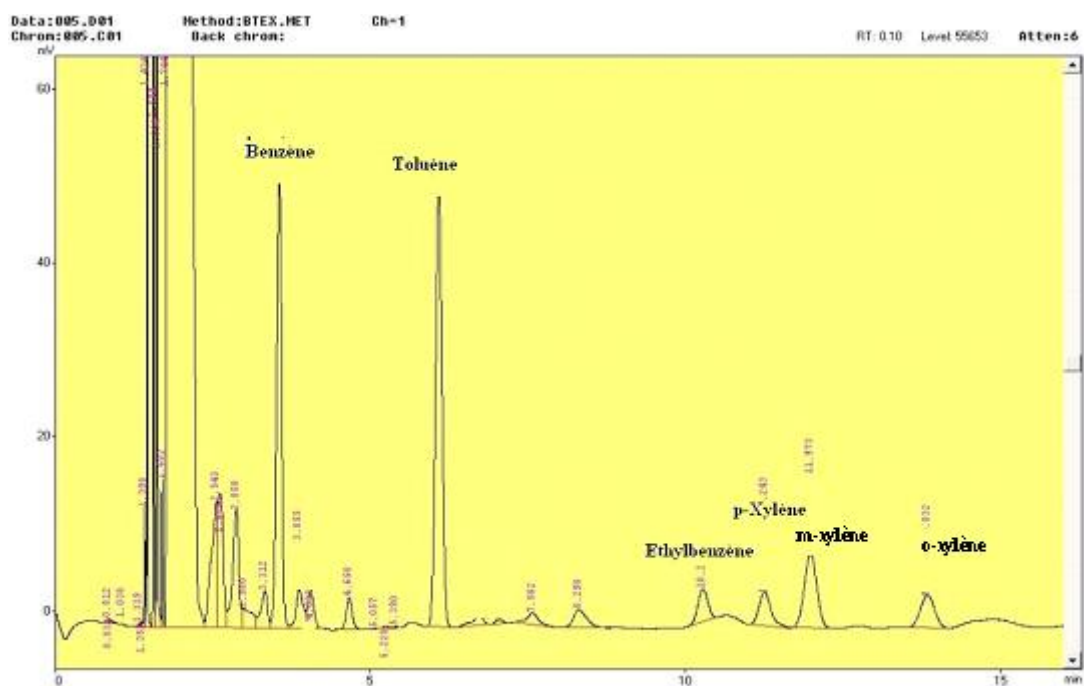


Figure n° 11 : chromatogramme des BTEX mesures en site de proximité automobile de st Michel- 4 chemins de Kouba (site P8)

Les résultats obtenus sur l'ensemble des sites de mesure sont résumés en tableau n° 12 et n°13 pour les sites de fond urbain et les sites de proximité automobile respectivement

Tableau n° 12 : Teneurs atmosphériques en BTEX mesurées en sites de fond urbains en $\mu\text{g.m}^{-3}$

25 sites	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m-Xylène)	p-Xylène	o-Xylène	BTEX totaux	Rapport toluène /Benzène
F1	1,81	2,38	0,27	0,46	0,56	0,39	5.87	1,31
F2	1,69	1,41	0,18	0,36	0,40	0,35	4.39	0,83
F3	1,82	1,71	0,24	0,19	0,64	0,27	4.87	0,94
F4	1,77	1,18	0,20	0,39	0,20	0,21	3.95	0,66
F5	1,38	1,00	0,14	0,25	0,13	0,17	3.07	0,72
F6	2,13	1,52	0,24	0,30	0,29	0,30	4.78	0,71
F9	1,69	1,96	0,34	0,65	n.d	0,29	4.93	1,16
F10	1,84	1,25	0,18	0,17	0,44	0,19	4.07	0,68
F12	0,39	0,32	1,15	n.d	0,56	n.d	2.42	0,82
F13	2,56	2,31	0,28	0,28	0,65	0,32	6.40	0,9
F14	2,15	2,00	0,24	0,23	0,54	0,28	5.44	0,93
F15	2,33	2,29	0,26	0,24	0,57	0,39	6.08	0,98
F16	2,41	2,79	0,35	0,80	n.d	0,45	6.80	1,16
F17	2,23	2,38	0,30	0,73	n.d	0,38	6.02	1,06
F18	2,42	2,51	0,31	n.d	0,39	n.d	5,63	1,03
F19	1,90	1,63	0,42	n.d	0,20	n.d	4.15	0,89
F20	2,45	3,00	0,36	1,06	n.d	n.d	7.37	1,22
F22	0,24	0,04	0,91	n.d	0,48	n.d	1.67	0,16
F23	2,13	2,45	0,30	0,26	0,62	0,28	6.04	1,15
F24	2,20	2,21	0,31	0,30	0,67	0,28	5.97	1
F25	2,26	2,27	0,32	0,25	0,66	0,33	8.98	1
F26	2,73	2,90	0,33	0,32	0,76	0,39	7.43	1,06
F27	2,17	2,34	0,23	0,22	0,53	0,24	5.73	1,08
F28	2,44	2,64	0,33	0,32	0,74	0,44	6.91	1,08
F29	2,25	2,43	0,24	0,25	0,25	0,31	5.73	1,08
F30	1,59	1,15	0,15	0,26	0,26	0,17	3.58	0,72
Moyenne des sites de fond urbain	1,96	1,92	0,33	0,32	0,41	0,25	5,2	0,93

n.d : non décelable

Tableau n° 13 : Teneurs atmosphériques en BTEX mesurées en sites de proximité automobile en $\mu\text{g.m}^{-3}$

9 sites	Benzène ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Toluène ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Ethylbenzène ($\mu\text{g m}^{-3}$)	m-Xylène ($\mu\text{g m}^{-3}$)	p-Xylène ($\mu\text{g m}^{-3}$)	o-Xylène ($\mu\text{g m}^{-3}$)	BTEX totaux	Rapport toluène /Benzène
P1	2,32	1,96	0,38	0,27	0,64	0,23	5.80	0,84
P2	1,89	1,51	0,37	0,39	n.d	0,16	4.32	0,8
P3	3,46	3,32	1,04	1,47	0,71	0,00	10	0,96
P4	2,65	2,97	0,35	1,11	0,82	0,46	8.36	1,12
P5	2,46	2,85	0,32	0,31	0,32	0,44	6.70	1,16
P6	4,05	5,17	0,70	0,71	1,42	0,87	12.92	1,28
P7	3,34	3,61	4,61	0,54	1,23	0,75	14.08	1,08
P8	2,74	3,28	0,77	0,45	0,45	0,61	8.30	1,19
P9	0,52	0,22	2,04	n.d	0,98	n.d	3.76	0,42
Moyenne des sites de proximité automobile	2,6	2,77	1,18	0,58	0,73	0,39	8,24	0,98

n.d : non décelable

Ces résultats montrent que parmi les BTEX et quelque soit le type de site étudié, le benzène et le toluène accusent les teneurs les plus élevées. L'isomère ortho-xylène montre de teneurs très faibles qui sont souvent en dessous du seuil de détection ($0,01 \mu\text{g.m}^{-3}$) de la technique analytique utilisée.

Les tableaux n° 14 et 15 résument les teneurs moyennes et extrêmes mesurées respectivement en sites de fond urbains et en site de proximité automobile.

Tableau n° 14 : Teneurs moyennes et extrêmes des BTEX mesurées en sites de fond urbains en $\mu\text{g.m}^{-3}$

	benzène	toluène	éthylbenzène	m-xylène	p-xylène	o-xylène	BTEX totaux	Rapport toluène /Benzène
moyenne	1,96	1,92	0,33	0,32	0,41	0,25	5,2	0,93
minimum	0,24 (F22)	0,04 (F22)	0,14 (F5)	n.d (F12,F18,F18)	n.d (F9, F16, F17, F20)	n.d (F12,F18,F19 ,F22)	1,06	-
maximum	2,73 (F26)	3 (F20)	3,21 (F25)	1,06 (F20)	0,76 (F26)	0,5 (F20)	8,98	-

Tableau n° 15 : Teneurs moyennes et extrêmes des BTEX mesurées en site de proximité automobile en $\mu\text{g.m}^{-3}$

	benzène	toluène	éthylbenzène	m-xylène	p-xylène	o-xylène	BTEX totaux	Rapport toluène /Benzène
moyenne	2,6	2,77	1,18	0,58	0,73	0,39	8,24	0,98
minimum	0,52 (P9)	0,22 (P9)	0,32 (P5)	0 (P9)	0 (P2)	0 (P3, P9)	3,76	-
maximum	4,05 (P6)	5,17 (P6)	4,61 (P7)	1,47 (P3)	1,42 (P6)	0,87 (P6)	14,08	-

La teneur moyenne en benzène s'élève en site urbain à $1,96 \mu\text{g.m}^{-3}$. Les BTEX totaux sont de l'ordre de $5,2 \mu\text{g.m}^{-3}$. En site de proximité automobile le benzène accuse des teneurs plus élevées et atteint en moyenne $2,6 \mu\text{g.m}^{-3}$. Les BTEX totaux sont eux aussi plus importants et s'élèvent à $8,24 \mu\text{g.m}^{-3}$ (tableau n° 14 et 15).

En sites de proximité automobile qui sont exposés directement aux émissions du trafic routier, les teneurs des six composés BTEX sont 40 à 250 % plus élevés qu'en sites urbains (tableau n°16).

Tableau n° 16 : Rapport BTEX_{proximité} / BTEX_{fond urbain}

B_p/B_f	T_p/T_f	E_p/E_f	m-X_p/m-X_f	p-X_p/p-X_f	o-X_p/o-X_f	BTEX_{t,p} / BTEX_{t,f}
1,33	1,44	3,58	1,81	1,78	1,56	1,58

Le plus faible rapport caractérise le benzène qui est peu réactif. En raison de leur très forte réactivité dans l'atmosphère, les composés étylbenzènes et xylènes diminuent fortement après leur émission et les rapports indiqués en tableau n°16 sont plus élevés que dans le cas du benzène et du toluène. L'ensemble des BTEX dépasse en site de proximité de 60% les teneurs mesurées en site de fond.

La mesure des BTEX montre que dans le cas des xylènes la séparation des isomères méta et para a permis de montrer qu'à Alger les teneurs en p-xylène sont, que ce soit en milieu urbain ou en site de proximité, plus élevées que celles du méta-xylène. On note par ailleurs que l'o-xylène constitue environ le quart de l'ensemble des isomères.

Le rapport toluène/benzène est de l'ordre de l'unité sur les deux types de sites. Ce rapport est faible comparativement aux résultats trouvés dans la littérature. Les carburants étant plus riches en toluène qu'en benzène, on s'attend à ce que la mesure des émissions automobiles reproduise cette proportionnalité.

3- Composition massique (%) et rapports dans les BTEX :

L'étude de la fraction massique moyenne de chaque composé relative à l'ensemble des BTEX est donnée en tableau n° 17.

Tableau n° 17 : composition massique des BTEX

	benzène	toluène	éthylbenzène	m-xylène	p-xylène	o-xylène
Fraction massique (%) sites urbain	37,7	36,9	6,3	6,1	7,9	4,8
Fraction massique (%) sites de proximité automobile	31,5	33,6	14,3	7	8,8	4,7

Les BTEX se comportent ainsi dans les rapports :

Urbain : $B : T : E : X = 5,9 : 5,8 : 1 : 2,9$

Trafic routier : $B : T : E : X = 2,2 : 2,3 : 1 : 1,4$

Ces rapports dépendent de la composition du carburant et des réactions photochimiques. Comme les teneurs en toluène mesurées à Alger sont faibles, ces rapports sont différents de ceux présentés dans certaines études similaires menées dans d'autres villes [93].

L'examen du rapport (m+p) xylène / éthylbenzène qui renseigne sur l'origine des BTEX donne :

Sites urbains : (m+p) xylène / éthylbenzène = 2,2

Sites proximité trafic : (m+p) xylène / éthylbenzène = 1,1

Ce rapport varie de 2,8 à 4,6 avec une valeur moyenne de 3,5 [14] dans les gaz d'échappement ou dans les prélèvements effectués dans des tunnels où les polluants ne sont pas encore dilués dans l'air ambiant. Comme les xylènes sont très réactifs dans l'atmosphère (oxydation par les radicaux OH[.]), ce rapport diminue et varie de 2 à 3 dans les milieux urbains ou sites influencés par les émissions du trafic routier et l'évaporation du carburant.

Dans notre étude, ce rapport qui varie selon le type de site de 1,1 à 2,2, suggère qu'à Alger le trafic routier est la principale source d'émission des BTEX.

4- répartition des BTEX selon les communes :

L'examen des teneurs en benzène et des niveaux des BTEX totaux en fonction des sites suivis montre qu'en milieu urbain (tableau n° 12) le site F26, Sûreté de Daïra d'Hussein Dey est le plus pollué. Le site le moins pollué est l'université du Caroubier (F22). Ce dernier est en effet assez isolé et se caractérise par une très bonne ventilation naturelle (site ouvert sur la mer).

En ce qui concerne les sites de proximité automobiles, on relève que les sites « la poste quatre chemins » à Kouba (P7) et le « pont de l'autoroute » à la Farge (P6) sont les plus contaminés par les BTEX et ce en raison de l'intensité du trafic routier qui règne en permanence en ces sites.

Dans ce contexte, il est intéressant de comparer deux sites de types différents mais proches l'un de l'autre : C'est par exemple le cas du site de « l'ENP - cours intérieure » (F10) et celui de « Hacen Badi - entrée service des impôts » (P3). Ces deux sites distants d'environ 300m accusent des taux de pollution très différents :

ENP :	Benzène = 1,84 $\mu\text{g.m}^{-3}$	BTEX totaux = 4,07 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Hacen Badi :	Benzène = 3, $\mu\text{g.m}^{-3}$	BTEX totaux = 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$

Cette comparaison montre clairement l'impact du trafic routier sur les niveaux de pollution. Le site de Hacen Badi se caractérise par une congestion sur toute la journée du trafic routier et la présence d'une station service (évaporation des BTEX lors du ravitaillement en carburant).

L'étude des niveaux de pollution par commune est donnée en tableau n° 18 (seuls les sites urbains sont comptabilisés dans la moyenne par commune).

Le tableau n°19 résume par commune les teneurs moyennes en benzène, la somme des BTEX, la population et la densité de population pour les sites urbains.

Ces résultats montrent que la commune de Bachdjerrah et celle d'Hussein Dey sont les plus polluées. Ceci s'explique facilement par la densité du trafic routier régnant à l'intérieur de ces zones et à la présence d'un bâti très dense qui empêche la ventilation naturelle et donc le transport et la dilution des polluants.

Le classement des sites urbains par taux de pollution est donné sous forme d'histogramme pour le Benzène et les BTEX totaux en figures n° 12, 13.

Pour les sites de proximité, les teneurs sont naturellement gouvernées par l'intensité du trafic routier. Le classement des sites en fonction du taux de pollution est donné en figure n°14 et n° 15 respectivement pour le Benzène et les BTEX totaux.

Les figures n° 16 et 17, illustrent les taux de pollution selon les communes étudiées.

Tableau n° 18 : Teneurs moyennes des BTEX par commune en $\mu\text{g.m}^{-3}$

communes	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m-Xylène	p-Xylène	o-Xylène
BORDJ EL KIFFAN	1,75	1,89	0,22	0,41	0,48	0,37
DAR EL BEIDA	1,83	1,71	0,24	0,19	0,64	0,27
BAB EZZOUAR	1,76	1,23	0,19	0,31	0,20	0,22
OUED SMAR	1,69	1,96	0,34	0,65	n.d	0,29
EL HARRACH	1,12	0,78	0,66	0,17	0,5	0,19
MOHAMMADIA	2,35	2,2	0,26	0,25	0,59	0,33
BOUROUBA	2,24	2,32	0,35	0,38	0,15	0,2
BACH DJERRAH	2,45	3	0,36	1,06	0,00	n.d
EL MAGHARIA	1,19	1,25	0,61	0,13	0,55	0,14
HUSSEIN DEY	2,5	2,58	0,32	0,28	0,71	0,36
KOUBA	2,13	2,27	0,27	0,27	0,55	0,30

Tableau n° 19 : Teneurs moyennes du benzène et des BTEX totaux, la population et la densité de population par commune

communes	Concentration moyenne en benzène ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	BTEX totaux ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Population au 01.01.2004	Densité (Hab/Km ²)
BORDJ EL KIFFAN	1,75	6,95	112.896	5.202
DAR EL BEIDA	2,07	4,87	50.690	1.522
BAB EZZOUAR	1,76	3,93	100.388	12.197
OUED SMAR	1,79	4,93	22.846	2.803
EL HARRACH	2,09	4,19	50.671	5.379
MOHAMMADIA	2,35	5,97	45.142	5.649
BOUROUBA	2,24	6,79	80.988	23.890
BACH DJERRAH	1,3	7,37	93.965	31.321
EL MAGHARIA	1,19	3,86	32.022	20.396
HUSSEIN DEY	3,01	8,05	52.295	12.275
KOUBA	2,39	6,12	111.709	11.115

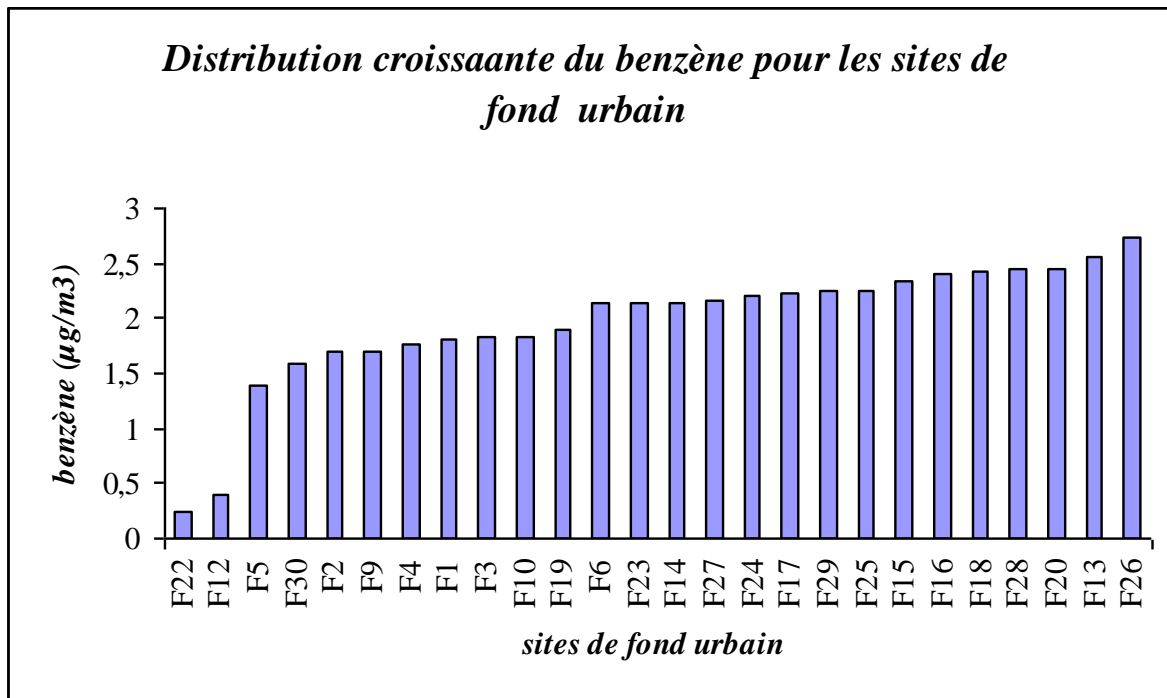


Figure n°12 : Distribution croissante du benzène en sites de fond urbain

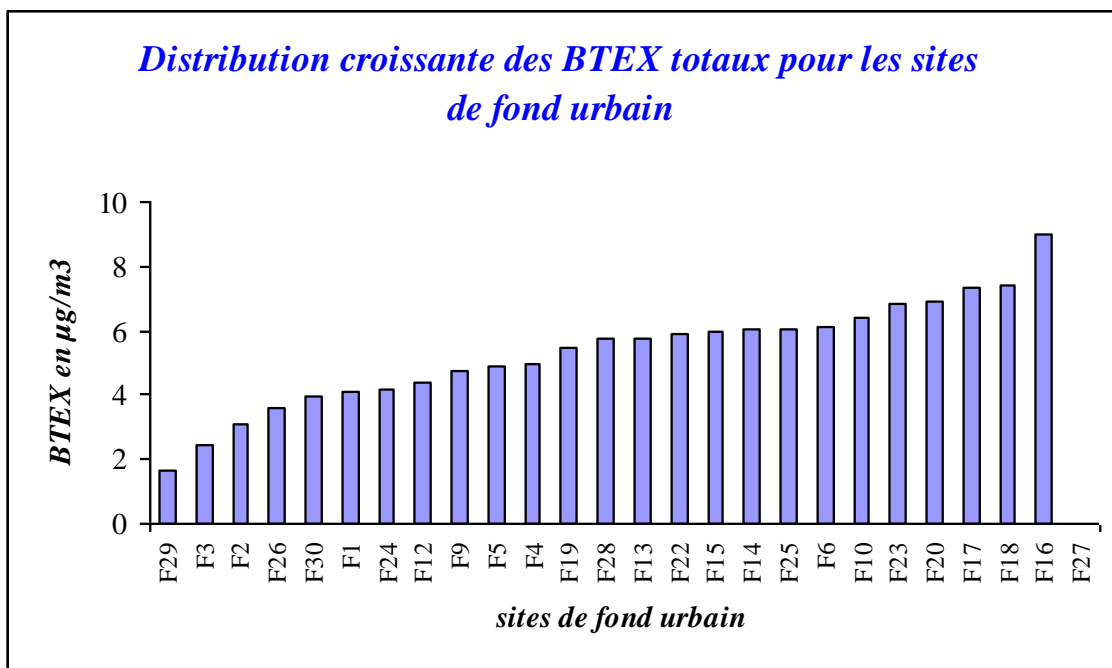


Figure n°13 : Distribution croissante des BTEX totaux en sites de fond urbain

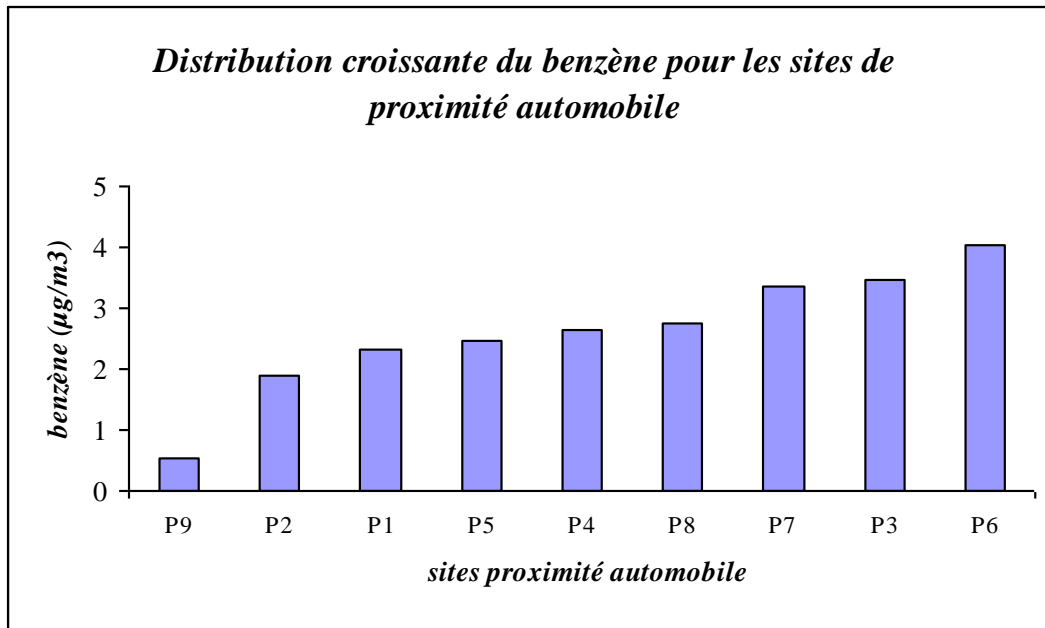


Figure n°14 : Distribution croissante du benzène en sites de proximité automobile

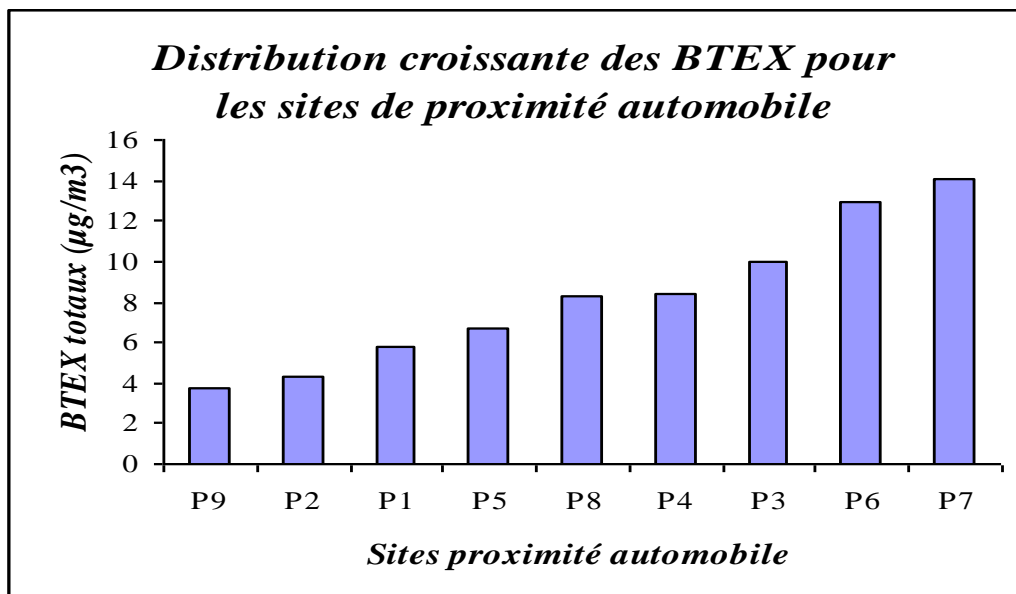


Figure n°15 : Distribution croissante des BTEX totaux en sites de proximité automobile

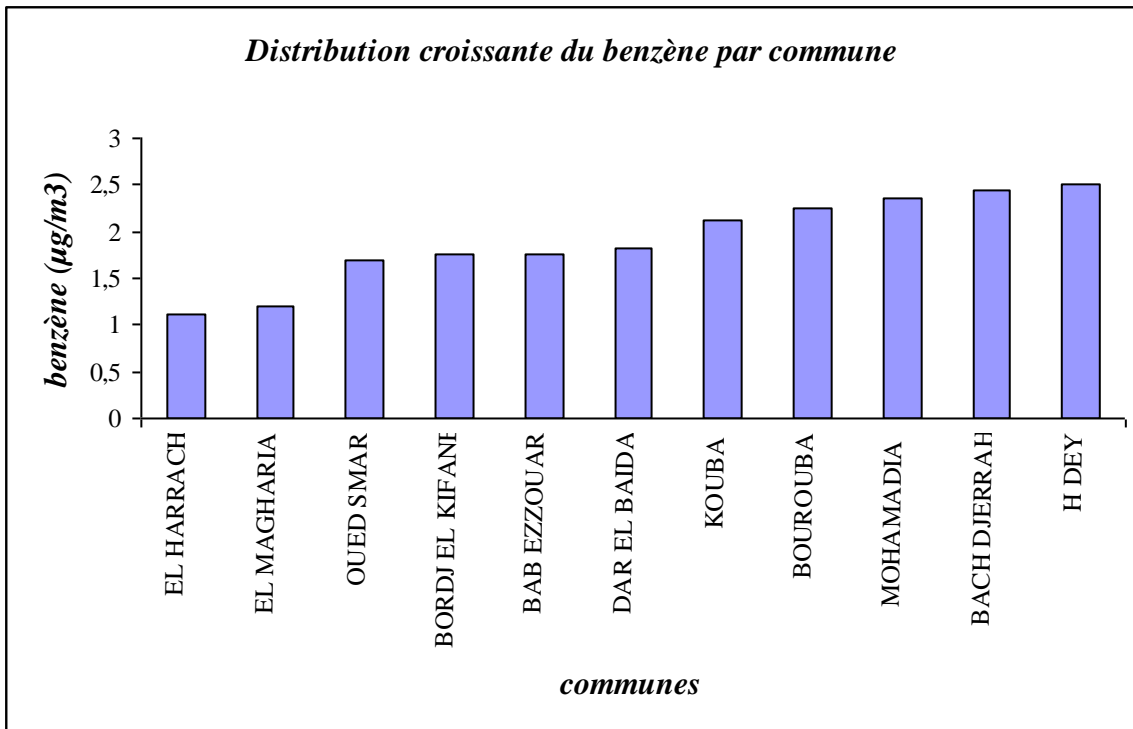


Figure n°16 : Distribution croissante du benzène par communes

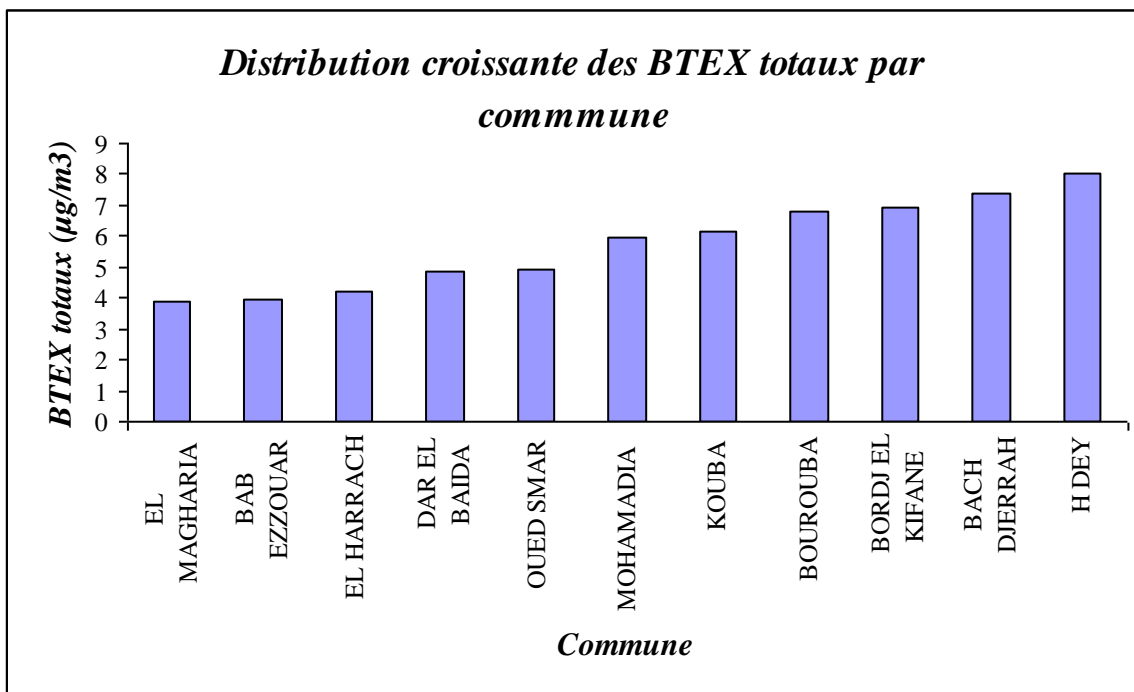


Figure n°17 : Distribution croissante des BTEX totaux par communes

5- *Corrélation entre les polluants et autres paramètres :*

L'étude des corrélations entre les différents BTEX montre que la meilleure corrélation est obtenue dans le couple benzène / toluène aussi bien au niveau des sites urbains que des sites de proximité automobile (figure n° 19, 20 et 21).

En site de proximité avant que le toluène ne commence à réagir dans l'atmosphère, on obtient un meilleur facteur de corrélation.

Des corrélations moins significatives sont obtenues dans le cas des autres polluants BTEX qui sont très réactifs.

Il existe aussi une bonne corrélation entre le benzène et les BTEX totaux (figure n° 22, 23 et 24). Ces bonnes corrélations observées aussi bien en sites de proximité qu'en sites urbains suggèrent que même dans les villes, le trafic routier est à l'origine de cette pollution et qu'il n'y a pas ou très peu d'autres sources émettrices des BTEX (usine, solvant, peinture,).

Ainsi, pour ces sites, la seule mesure du benzène permet de déduire avec une bonne approximation le niveau de pollution par les BTEX.

L'évolution des teneurs en benzène et en BTEX totaux avec la densité de population des communes ne donne pas un bon facteur de corrélation, mais on observe une claire tendance où le taux de pollution croît avec la densité de population des communes (figure n° 25 et 26).

En effet on peut bien s'imaginer que, le niveau socio-économique étant dans ces communes approximativement le même, le nombre de véhicules et les déplacements motorisés sont directement liés à la densité de population.

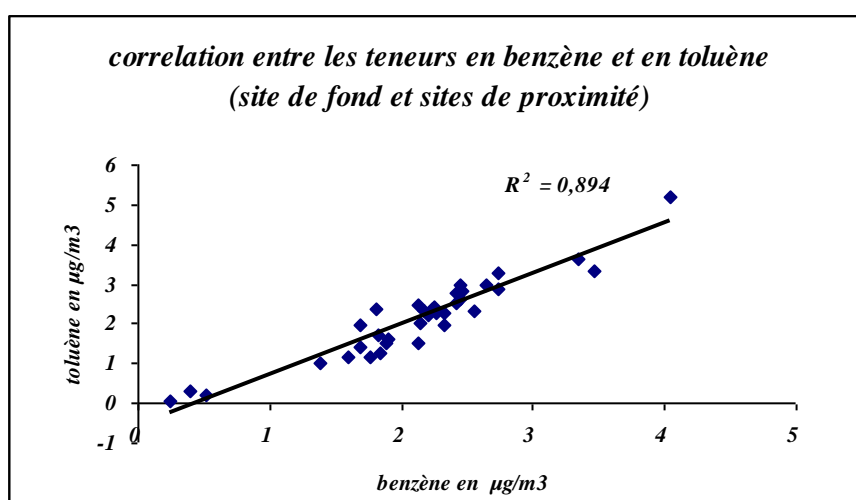


Figure n°19 : corrélation entre les teneurs en benzène et en toluène (sites de fond urbain et les sites de proximité automobile)

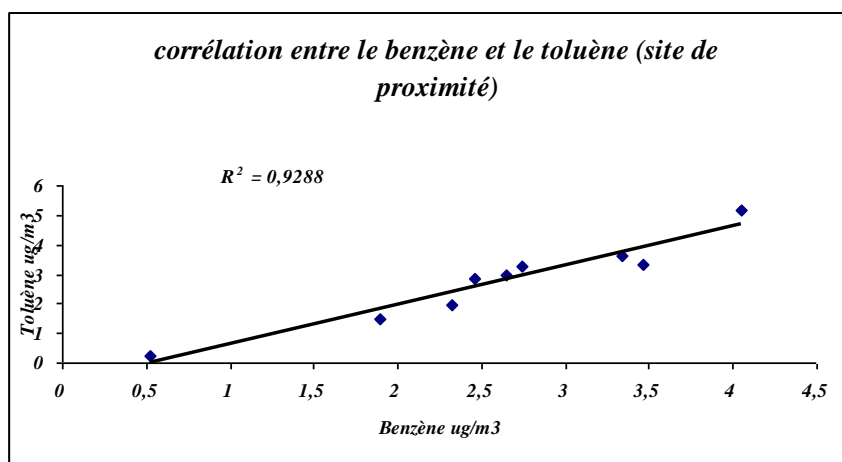


Figure n°20 : corrélation entre les teneurs en benzène et en toluène (sites de proximité automobile)

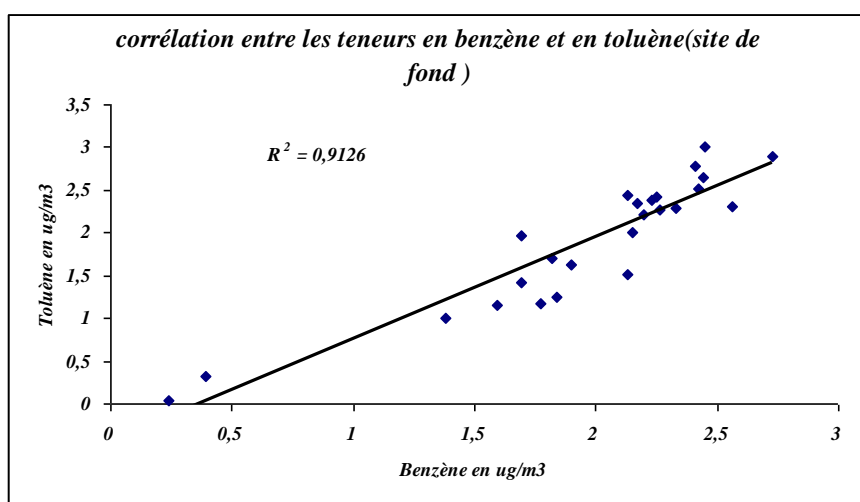


Figure n°21 : corrélation entre les teneurs en benzène et en toluène (sites de fond urbain)

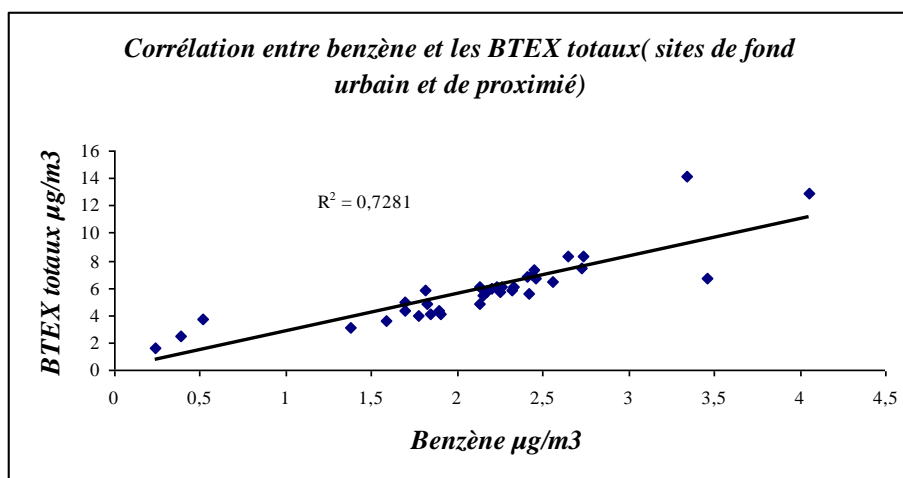


Figure n°22 : corrélation entre les teneurs en benzène et les BTEX totaux (sites de fond urbain et site de proximité)

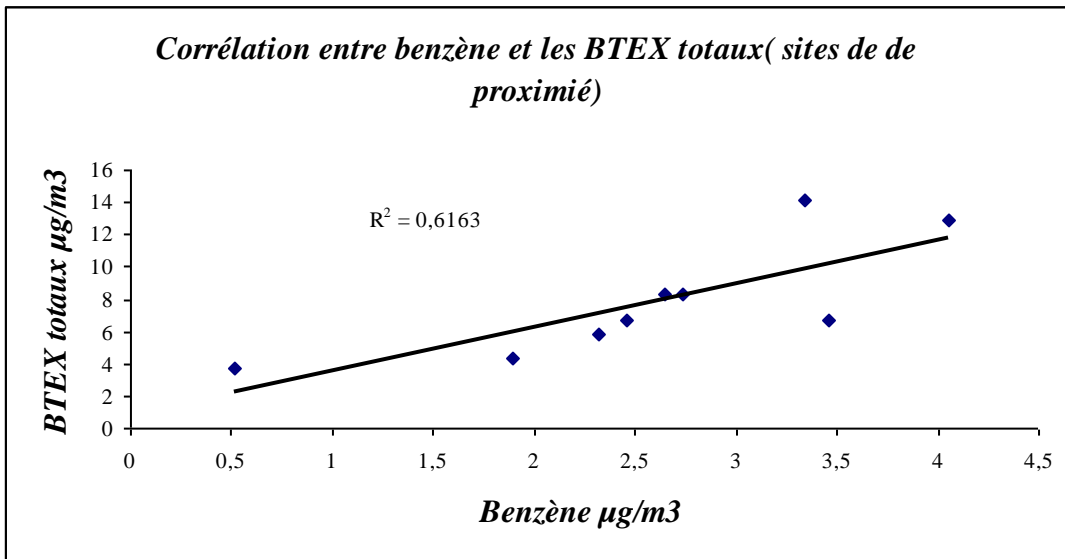


Figure n°23 : corrélation entre les teneurs en benzène et les BTEX totaux (sites de proximité)

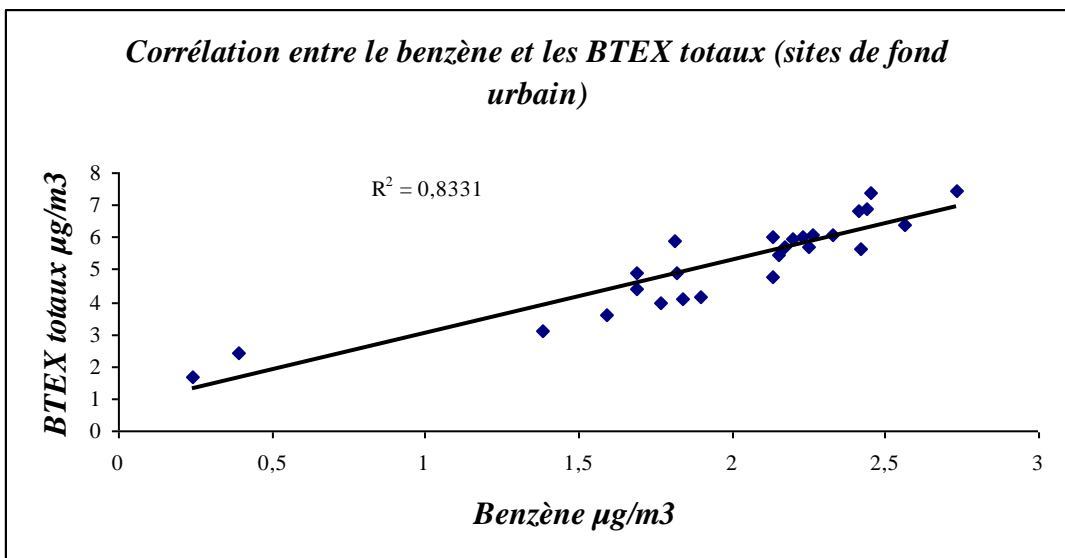


Figure n°24 : corrélation entre les teneurs en benzène et les BTEX totaux (sites de fond urbain)

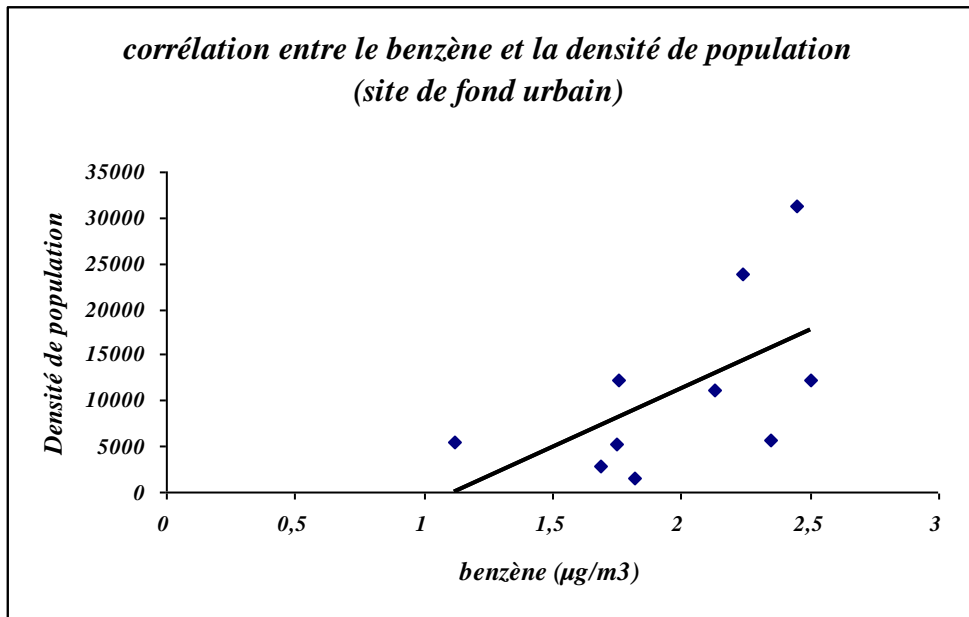


Figure n°25 : corrélation entre les teneurs en benzène et la densité de population (sites de fond urbain)

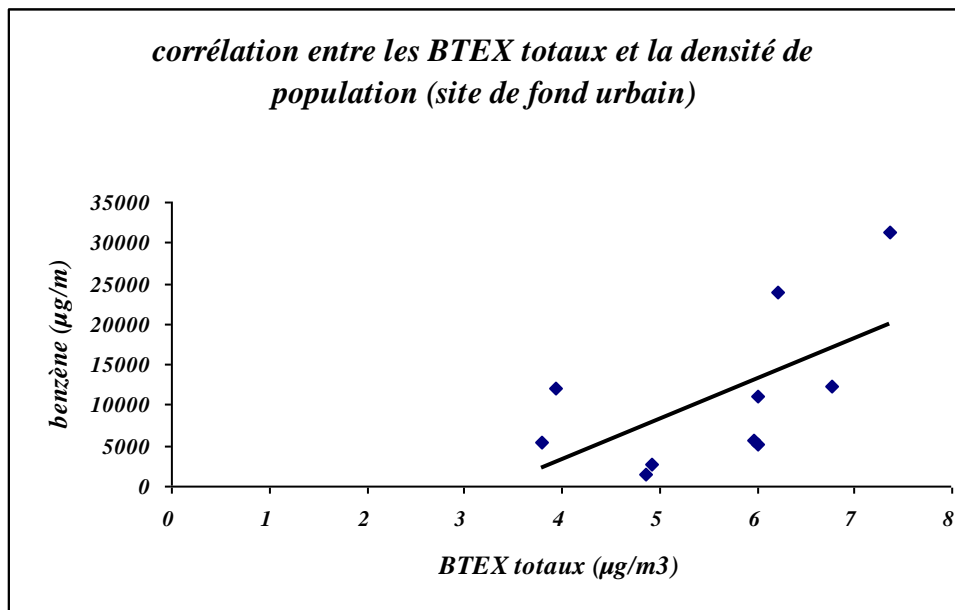


Figure n°26 : corrélation entre les teneurs en BTEX totaux par commune et la densité de population (sites de fond urbain)

6- Comparaison des niveaux de pollution aux normes :

Pour situer l'ampleur des niveaux de pollution mesurés à Alger, il est utile de les comparer aux normes et objectifs de qualité en vigueur dans d'autres pays.

On constate d'après le tableau n° 20 que la pollution à Alger Est par le benzène n'est pas très importante. Que ce soit en site urbain ou de proximité, les seuils limites européens ne sont pas dépassés. Par contre l'objectif de qualité de $2\mu\text{g m}^{-3}$ fixé dans le but de prévenir et de réduire les effets nocifs est dépassé dans plusieurs communes (figure n° 27).

Globalement, les teneurs en benzène mesurées en milieu urbain à Alger sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées dans plusieurs villes en France [57].

Tableau n° 20 : normes en vigueur dans certains pays (teneurs limites en benzène)

Pays	Valeur limite $\mu\text{g.m}^{-3}$	Objectif de qualité $\mu\text{g.m}^{-3}$	Observation	Réf.
France	10		Moyenne annuelle jusqu'à 2005 Puis dégressif de $1\mu\text{g m}^{-3}$ par an jusqu'à 2010	[32]
	5		Moyenne annuelle à partir de 2010	
			2	Moyenne annuelle
Allemagne	10		Moyenne annuelle à partir de 1998	[34]
Pays-bas	10		Moyenne annuelle	[35]
		1		
Union Européenne	5		Moyenne annuelle	[36]
Angleterre	5 ppb (16)		Moyenne annuelle	[12]
		1 ppb (3.2)	Moyenne annuelle	
eilartsuA	5ppb (16 $\mu\text{g.m}^{-3}$)		Moyenne annuelle	[37]
OMS et USA	Pas de seuil limite mais des indicateurs des risques unitaires			
Teneurs mesurées à Alger	Urbain : 1,96 Proximité : 2,06			Présent travail

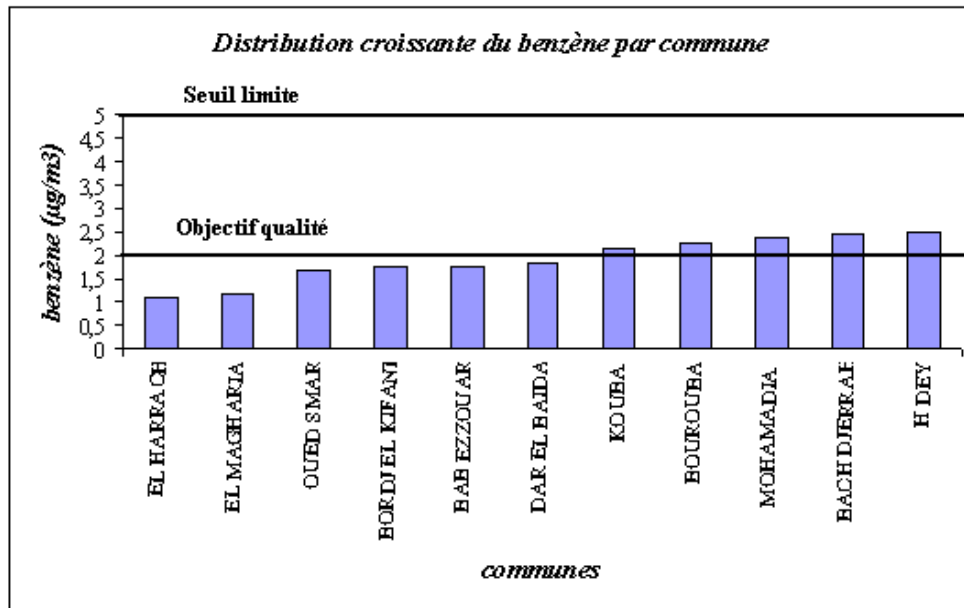


Figure n° 27 : Comparaison des niveaux mesurés à Alger par rapport aux normes

IV-2- Exploitation du Système d'Information Géographique :

En vu d'avoir une base de donnée sur l'ensemble des teneurs des BTEX, nous avons effectué un traitement sur Système d'Information Géographique (SIG) ce qui permet une lecture optimale et rapide des teneurs. Les paramètres à introduire sont : le nom, la référence, le site, la commune, la densité de population, les concentrations des différents BTEX.

Une visualisation d'une telle information est illustrée en figure n° 28.

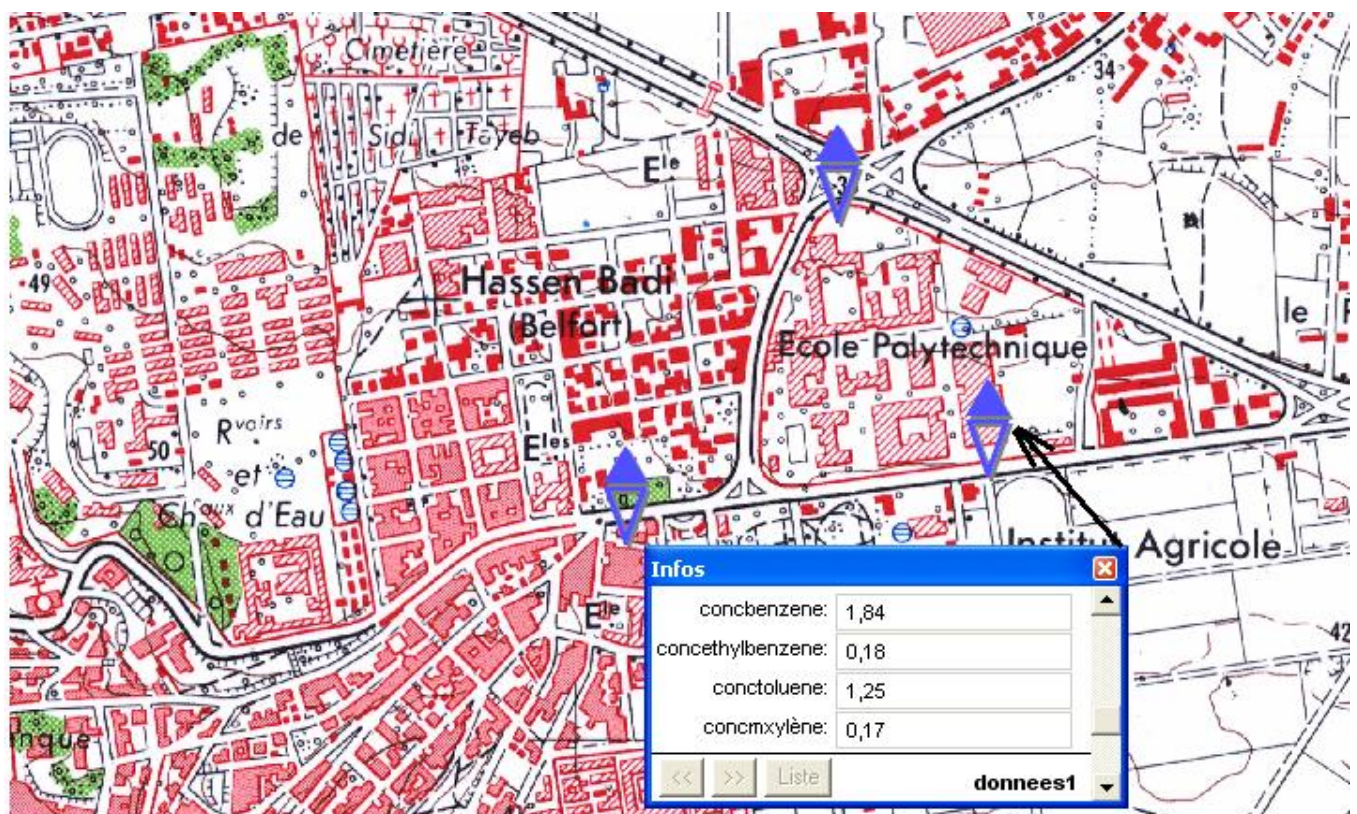


Figure n° 28 : visualisation directe des niveaux de pollution sur carte (traitement par SIG des données)

Il nous a été par ailleurs possible d'aboutir à une cartographie simple de la pollution par utilisation d'un outil supplémentaire pour les SIG. Les principaux apports sont :

- Mise à disposition de nouvelles techniques d'analyse des informations localisées qui varient de manière continue dans l'espace,
- capacité de comparaison et d'analyse sur de multiples couches de données,
- des visualisations originales.

Cet outil utilise le « grid file » qui permet de représenter des données qui varient de manière continue dans l'espace comme l'ensoleillement, la pollution, la température ou l'altitude.

Le Grid File est une information de type image « raster » composée d'une succession d'éléments carrés disposés d'une manière organisée en lignes et colonne sur une zone donnée.

Plusieurs méthodes d'interpolation et de modélisation peuvent être utilisées pour créer des grids :

- par pondération inverse à la distance
- par triangulation avec lissage

- par interpolation rectangulaire qui utilise les 4 points les plus proches (bilinéaire)
- par méthode géométrique du plus proche voisin
- par méthode co-statique utilisant à la fois l'éloignement et la variance des valeurs représentées

Dans notre étude nous avons utilisé l'interpolation par triangulation irrégulière qui utilise un réseau de triangles aussi équilatéraux que possible qui vont connecter les points du lot de données. Une expression polynomiale lisse alors la surface suivant les x et y pour chaque face de triangle.

L'exploitation de nos données par ce logiciel nous donne la cartographie des différenciels BTEX : BTEX totaux, benzène, toluène, éthylbenzène, m-xylène, p-xylène et o-xylène telle que présentée dans les annexes 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9.

V- CONCLUSION :

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'évaluation des teneurs atmosphériques en BTEX sur la zone d'Alger-Est. Ces derniers ont été mesurés à l'aide de tubes échantillonneurs passifs qui collectent spécifiquement les polluants présents dans l'air ambiant et permettent ainsi d'estimer une concentration moyenne sur la durée d'exposition.

L'utilisation des tubes passifs permet de réaliser des mesures sur des zones très vastes et de déterminer, avec un coût acceptable, la distribution spatiale des polluants à l'immission. Un maillage de la zone à étudier a été effectué, ce qui a permis de retenir 40 sites de mesure répartis sur 12 communes de l'Est d'Alger ;

Cette étude a permis de cerner, ponctuellement, l'impact du trafic routier sur la qualité de l'air. Ainsi les capteurs ont été placés au bord des autoroutes et des sites urbains.

Les teneurs en benzène en sites urbains sont en moyenne de l'ordre de $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et l'ensemble des BTEX atteint un niveau moyen de $5,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ BTEX.

Les sites de proximité exposés directement aux émissions du trafic routier accusent des teneurs en BTEX qui sont plus élevées que les sites urbains. Le rapport entre site urbain et site de proximité dépend de la réactivité du polluant considérée.

Les communes de Hussein Dey et Bach Djerah accusent les taux de pollution les plus élevés.

L'étude des corrélations entre les différents BTEX montre que les meilleures corrélations sont obtenues dans le cas des couples benzène/toluène et benzène/BTEX totaux.

Ce résultat suggère que les BTEX sont de même origine, le trafic routier et les évaporations du carburant; et qu'il n'existe pas d'autres sources importantes de pollution par les BTEX.

L'étude montre également que dans les communes d'Alger Est, le taux de pollution croît avec la densité de population.

La comparaison avec les normes internationales, montre qu'à Alger Est le niveau de pollution par les BTEX n'est pas alarmant, mais que l'objectif de qualité de $2\mu\text{g.m}^{-3}$ de benzène en vigueur en occident n'est pas respecté.

L'exploitation des résultats sur Système d'Information Géographique a permis de montrer qu'on peut facilement faire une visualisation spatiale des données.

L'étude donne ainsi de précieux indicateurs pour le choix des sites à surveiller lors d'une éventuelle extension du réseau de surveillance de la qualité de l'air d'Alger « SAMAA SAFIA ».

Enfin le travail effectué servira de base pour la réalisation d'une cartographie de la pollution par les BTEX à Alger et d'étendre l'étude à toute l'agglomération d'Alger (centre, est et ouest d'Alger).

Bibliographie

- [1] Boukadoum A, étude de la pollution de l'air par les composés aromatiques benzène, toluène et xylène (BTX) à Alger, thèse magister 2005, ENP Alger
- [2] Kirk R.E et Othmer D.F, Encyclopaedia of chemical technology, vol .3, Wiley Interscience, New-York, 1978
- [3] INRS, benzène, FT49, Institut National de Recherche et de Sécurité, 1997, France
- [4] Oudiz A, Fahri F. et Lombard J., La filière benzène, INSERM, rapport N° 49, France, 1988
- [5] [http:// www.ines.fr/actualités/benzène](http://www.ines.fr/actualités/benzène)
- [6] European Union, Commission the Auto-Oil Programme, A Report from the Service of the European commission, 1999, pp 110
- [7] AIRPARIF, Surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France, étude tubes passifs benzène, Paris, décembre 2000
- [8] NAFTEC, Direction de la production, Communication personnelle, Alger, janvier 29-04-2004.
- [9] Donati J, Teneur en hydrocarbures aromatiques monocycliques dans l'air ambiant à Paris, Pollution atmosphérique, janvier-mars 1995, pp.43-51
- [10] Zdanévitch T et N.Gonzalez- Flésca, Influence of vehicle traffic in town centre on BTX pollution, Int.J.Vehicle Design, Vol. 27, 1-4, 2001, pp.105-117
- [11] Gaessler J.P et P.Obe, Pétrole et pollution atmosphérique, Pétrole et Technique N°361, janvier février 1991, pp.29-33.
- [12] Colls J, Air pollution, FN Spon, London, 1997
- [13] Surveillance de la qualité de l'air en aquitaine, rapport n° ET/CA/02/02, www.airq.fr
- [14] Compagne de mesures par échantillonnage passif, unité urbaine de Bayonne, rapport n° ET/TP/05/01 ; surveillance de la qualité de l'air en aquitaine, www.airaq.asso.fr
- [15] Environnement Canada, Problématique du benzène dans l'Est de Montréal, Montréal (Québec), 2001.
- [16] Rinsky, R.A., Smith A.B et Horning R., Benzene and leukaemia: an epidemiologic risk assessment, N. Engl. J. Med. N°316, 1987, pp.1044-1050
- [17] INCHEM, International Program on Chemical Safety, Environmental Health Criteria N°150 : benzene, world health organisation, Genova, 1993

- [18] ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological profile for benzene. Update, US. Department of health and human services, Atlanta, 1997
- [19] IARC, International Agency for Research on Cancer, IARC monographs on the evolution of the carcinogenic risk of chemicals to humans, benzene, IARC, Lyon, 1982
- [20] Nomiyama K. and Nomiyama H, Respiratory retention, Uptake and excretion of organic solvents in man, Int. arch. Arbeitsmed, 32, 1974, pp. 75- 83
- [21] Aksoy M., Dincol K., Akgun T., Erdem S. and Dincol G., Details of blood changes in patients with pancytopenia associated with long-term exposure to benzene, Br.J. Ind. Med, 29, 1, 1972, pp. 56-64
- [22] US.EPA, Benzene oral carcinogenicity, US Environmental Protection Agency, 2000
- [23] Aksoy M., Dincol K., Akgun T., Erdem S. and Dincol G., Haematological effects of chronic benzene poisoning in 217 workers, Br. J. Ind. Med, 28, 3, 1971, pp.296-302
- [24] ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological profile for benzene. Update, US. Department of health and human services, Atlanta, 1997
- [25] WHO, Air Quality Guidelines for Europe 2^{ed} Ed., WHO regional Publication Copenhagen, European Series, N°91, 1999,
- [26] US.EPA, Benzene inhalation carcinogenicity, US. Environmental Protection Agency, 1998.
- [27] IUCLID, Benzene. International Uniforme Chemical Information Database, Commission Européenne, Bureau des substances chimiques, Ispra, Italie, 1996
- [28] Toxic Air pollution; Volatile organic compounds at urban sites in New Jersey, Lewis Publishers INC, 1987, pp.69-90.
- [29] Dann T. Ambient air measurements of benzene in Canada (1989-1998), Proceedings of the Air and Waste Manag. Ass, Salt Lakes City, Utah, USA, June 18-22, 2000
- [30] La Commission Européenne, Du benzène et des villes, Magazine de la recherche européenne, RDT- Info N°23, 2002
- [31] Leung P.L. and Harrison R.M., Traffic-related exposure to benzene and toluene, Int. J. vehicle Design, Vol.20, N° 1-4, 1998, pp. 55-59
- [32] Journal officiel de la République Française. Décret N° 2002-213 du 15 février 2002 relatif à la fixation de valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant.
- [33] Journal officiel de la République Française, Décret N° 98-360 du 6 mai 1998, pp, 7196-7200

- [34] Bundes-Immissionsschutzgesetz- BImSchG (Federal Clean Air Act), Artikel 40, Section 2, Berlin, 1998
- [35] http://mrw.wallonie.be/dgrne/rapports/dppgss/air1997/obg_9.htm
- [36] Official journal of the European Communities, Directive 2000/69/EC of 16 November 2000 relating to limit values for benzene and Carbon monoxide in ambient air, L 313, 13 December 2000, pp. 12-21
- [37] Australian Occupational Health and Safety , Guidance Note on the Interpretation of Exposure Standards for Atmospheric Contaminants in the Occupational Environment, 1990
- [38] Kirk R.E , Othmer D.F., Grayson M et Eckroth D, Encyclopedia of Chemical technology, John Wiley, New York, 1983.
- [39] Loi Canadienne sur la protection de l'environnement, Liste des substances d'intérêt prioritaire, rapport N) 4-toluène, Ministère des approvisionnements et Services Canada, Ottawa, 1992.
- [40] Nielsen I.R. et P.Mowe, Environmental hazard assessment: Toluene, Toxic substances Division, Directorate for Air, Climate and Toxic Substances, Department of the Environment, Royaume-uni, 1991
- [41] Mackay D., Shiu W.Y. Ma K.C., Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental Fate for organic. Chemicals, Volume 1, Boca Raton, Lewis Publishers, 1992.
- [42] Sjodin A., Persson K. Andréasson K. Arlander B. and Galle B., On-road emission factors derived from measurements in a traffic tunnel, Int.J.Veh.Design, V20, N°1-4, 1998, pp 147-158
- [43] Low L.K., J.R. Meeks and C.R. Mackerer, "Health effects of the alkylbenzenes. I. Toluenes", Toxicol. Ind. Health, n°4, 1988, p. 49-75.
- [44] Sato A., Toxicokinetics of benzene, toluene and xylenes, IARC Sci. Publ. France, vol. 85, ch.3, 1988, p.47-64
- [45] Ogata M., Tomokuni K et Takastuka Y., « Urinary excretion of hippuric acid and m- or p-methylhippuric acid in the urine of persons exposed to vapours of toluene and m- or p-xylene as a test of exposure », Br. J. Ind. Med., N°27, 1970, pp.43-50
- [46] IPCS (International Programme on chemical Safety), Environmental Health Criteria 52. Toluene, IPCS, Organisation mondiale de la santé, Genève (Suisse), 1985, 146p.
- [47] Gamberale, F et Hultengren M., « Toluene exposure. II. Psychophysiological functions », Work Environ. Health, n°9 (3), 1972, pp. 131-139.

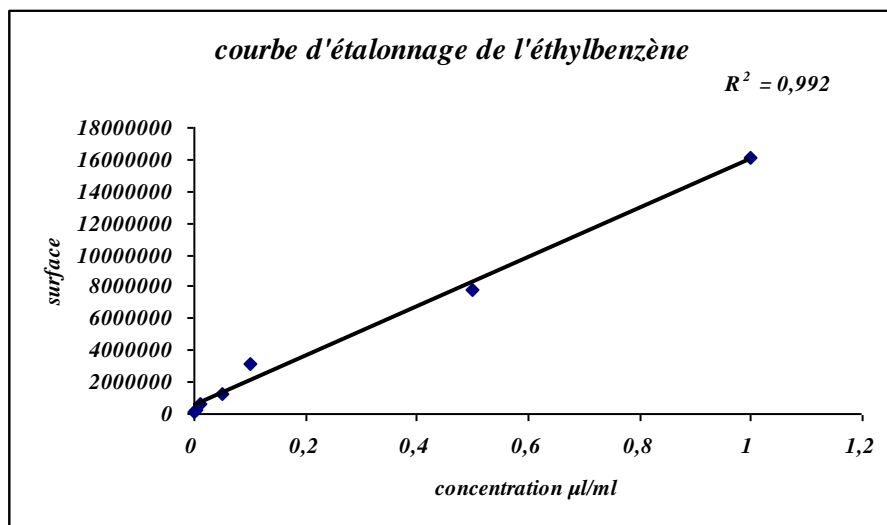
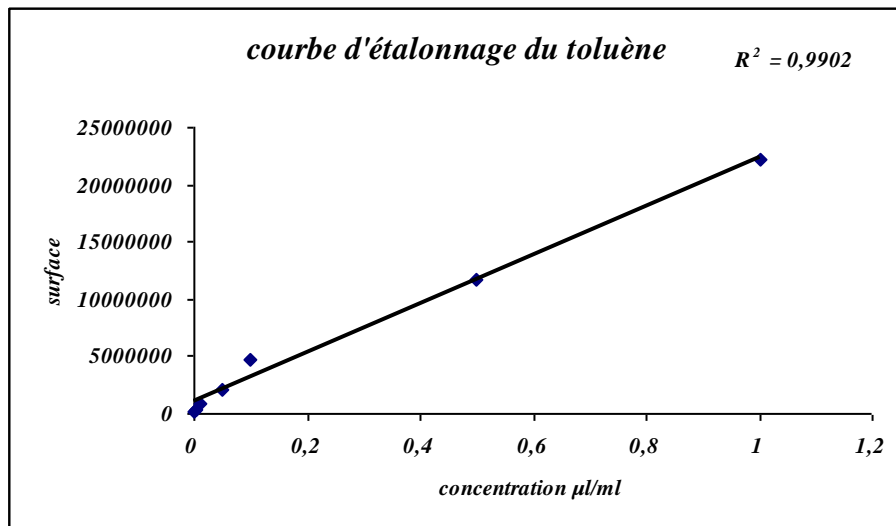
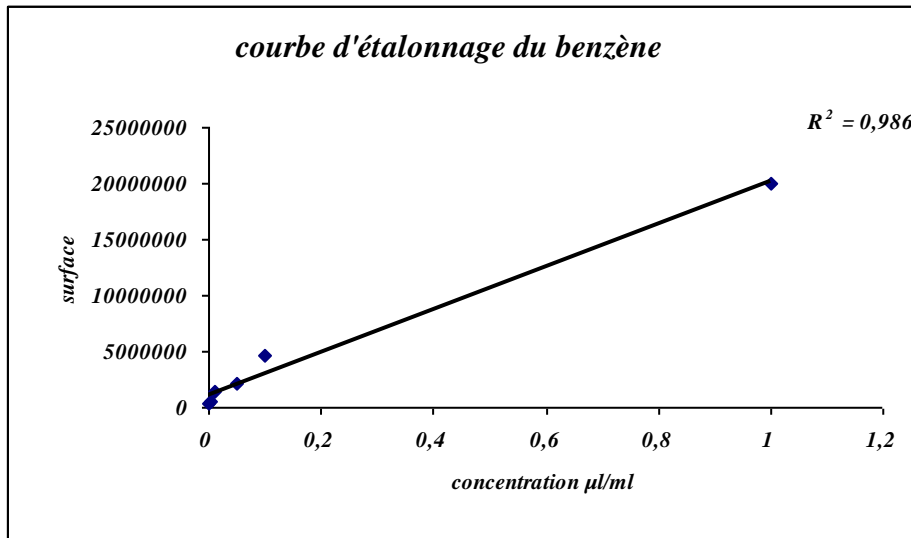
- [48] Winneke, G., "Acute behavioral effects of exposure to some organic solvents; psychophysiological aspects", *Occup. Neurol. Acta Neurol. Scand.*, n°66 (Suppl. 92), 1982, p. 117-129.
- [49] Echeverria, D., Fine L., Glangolf G., SChork A et Sampaio C., « Acute neurobehavioral effects of toluene », *Br. J. Ind. Med.*, n°46, 1989, p. 483-495.
- [50] Andersen, I.,Lundqvist G.R, L. Molhave, O.F. Pedersen, M. Veath, D.P. Wyon, "Human response to controlled levels of toluene in six hour exposure", *Scand. J. Work Environ. Health*, n°9, 1983, pp. 405-418.
- [51] Baelum, J., I. Andersen, G.R. Lundqvist, L.Mulhave, D.F. Pedersen, M. Veath et D.P. Wyon, " Response of solvent-exposed printers and unexposed controls to six-hour toluene exposure", *Scand. J. Work Environ. Health*, n°11, 1985, p.271-280.
- [52] Dick, R.B., J.V. Setzer, R. Wait, M.B. Hayden, B.J. Taylor, B.Tolos et V. Putz-Anderson, " Effects of acute exposure of toluene and methyl ethyl ketone on psychomotor performance", *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, n°54, 1984, pp. 91-109.
- [53] Lindbohm M.L., Spontaneous abortions among women exposed to organic solvent, *Am. J. Ind. Med.*, 17, 1990, pp 449-463
- [54] Clarkson T.S, R.J. Martin, Rudolph J. ,Graham B W. L., Benzene and toluene in New Zealand air, *Atm.Env*, vol.30, n°4, 1996, pp.569-577
- [55] Coursimault A., Donati J. et H. Viellard, Monoaromatic hydrocarbon emissions in Paris, In. *J. vehicle Design*, vol.20, n°1-4, 1998, pp. 46-54
- [56] Leung P.L and R.M. Harrisson, Traffic related exposure to benzene and toluene, *Int. J. vehicle Design*, Vol.20, n°1-4, 1998, pp. 55-59.
- [57] Kerbachi R., M. Keddou, M. Boughedaoui et L. Bounoua, Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers, *Atm. Env.* (40) 2006, pp. 3995-4003.
- [58] Fishbein L., An overview of environmental and toxicological aspects of aromatics hydrocarbons III. Xylene, *Sc. Tol. Environ.*, n°43, 1985, pp.165-183
- [59] Low L.K., J.R, Meeks and C.R. Mackener, Health effects of the alkylbenzene. II. Xylènes, *Toxical. Ind. Health*, n°5, 1989, pp.85-105
- [60] Loi canadienne sur la protection de l'environnement, Liste des substances d'intérêt prioritaire, rapport : xylènes, Ministère des Approvisionnement et Services, Canada, Ottawa, 1992

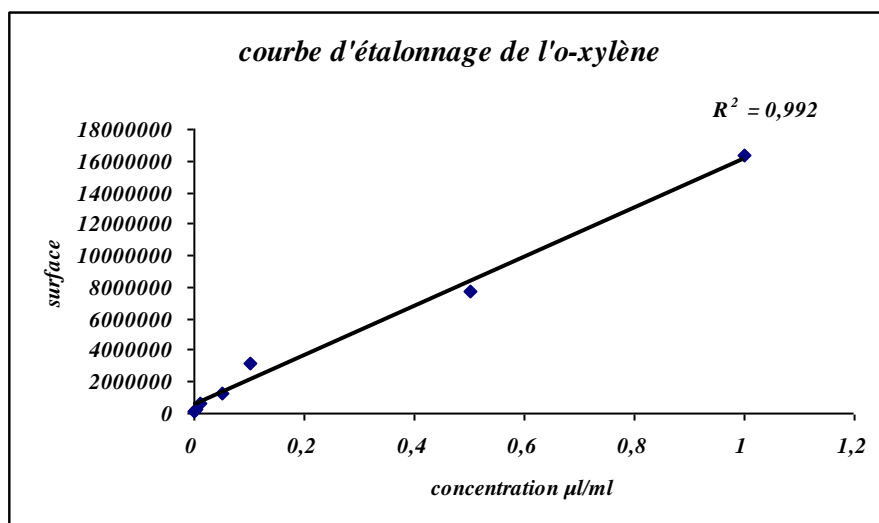
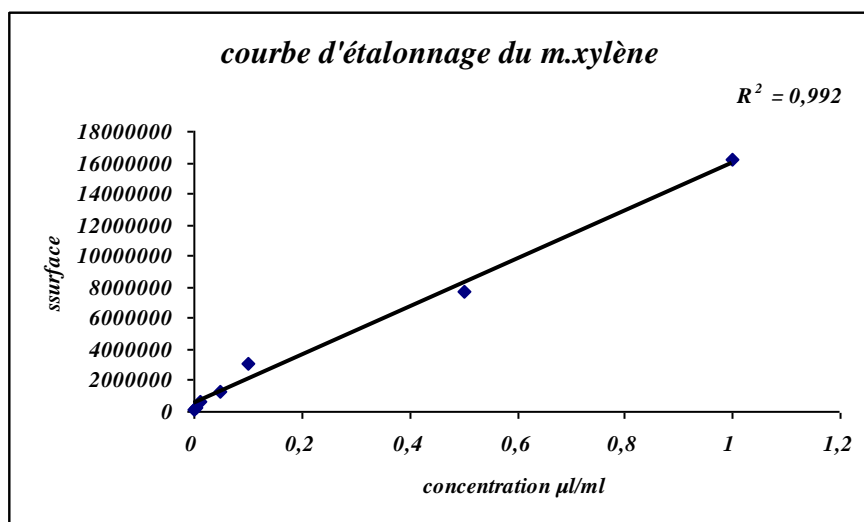
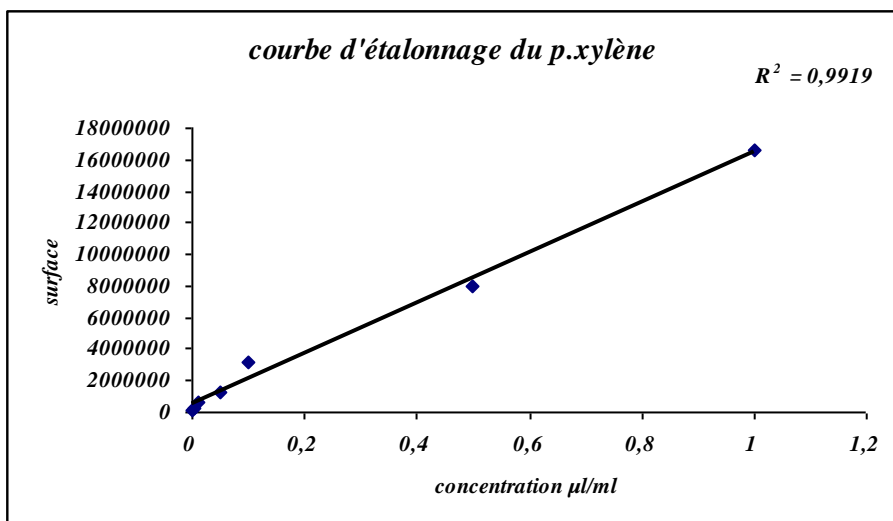
- [61] Angerer, J. and H. Wulf. « Occupational chronic exposure to organic solvents: XI, Alkylbenzene exposure of varnish workers: effects on haematopoietic system », *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, n° 56, 1985, p. 307-321.
- [62] Seppalainen, A.M., K. Husman and C. Martenson. « Neurophysiological effects of long-term exposure to a mixture of organic solvents », *Scand. J. Work Environ. Health*, n°4, 1978, p. 304-314.
- [63] Franchini I., A. Cavatorta, M. Falzoi, S. Lucertini and A. Mutti. « Early indicators of renal damage in workers exposed to organic solvents », *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, n°52, 1983, p. 1-9
- [64] Riihimaki, V. et K. Savolainen. "Human exposure to m-xylene, Kinetics and acute effects on the central nervous system", *Ann. Occup. Hyg.*, n°23, 1980, p. 411-422.
- [65] Savolainen, K., J. Kekoni, V. Riihimaki and A. Laine. « Immediate effects of m-xylene on the human central nervous system », *Arch. Toxicol.*, n°7, 1984, p.412-417.
- [66] Savolainen, K. and P. Pfaffli. "Dose-dependent neurochemical changes during short-term inhalation exposure to m-xylene", *Arch. Toxicol.*, n°45, 1980, p 117-122.
- [67] Seppalainen, A.M., A. Laine, T. Salmi, V.Riihimaki and E. Verkkala. « Changes induced by short-term xylene exposure in human evoked potentials », *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, n°61, 1989, p. 433-449.
- [68] Loeffgen L., K. Persson and A.M. Stroemvall, Exposure of commuters to volatile aromatic hydrocarbons from petrol exhausts, *Sc. Tot. Env.*, vol. 108, 1991, pp.225-233.
- [69] Cheng L.U, R. P Angle and H.S. Sandhu, Seasonal variation of volatile organic compounds in Edmonton, Alberta, *Atm. Env.*, vol.31, 1997, pp. 239-246
- [70] Field R.A., Goldstone M.E., Lester J.N. and Perry R., The sources and Behaviour of tropospheric anthropogenic volatile hydrocarbons, *Atm. Env.*, 26 A, 1992, pp. 2983-2996.
- [71] Monod A., B.C.Sive, Pasquale Avins, Tai Chen, D.R. Blake, F.S. Rowland, Monoaromatic compounds in ambient air of various cities: a focus on correlations between the xylenes and ethylbenzene, *Atm. Env.*, 35, 2001, pp. 135-149.
- [72] Atkinson R., Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds, A review, *Atm. Env.*, N°24A, 1990, pp. 1-41
- [73] R.G.Derwent, M.E. Jenkin, Hydrocarbons and the long range transport of ozone and PAN across Europe. *Atm. Env.*, 25A (8), 1991, pp 661-1679

- [74] Brocco D., Fratar C., Angell R., Leport L., Petrica M and Ventronne L., Determination of aromatic hydrocarbons in urban air of Rome, *Atm.Env.*, 34, 1997, pp.557-566
- [75] Carlien P. et G. Mouvier, Initiation à la physico-chimie de la basse troposphère, *poll.Atm.*, janv-mars 1998, pp.12-24
- [76] Megie G., Les modifications chimiques de l'atmosphère et leur effets sur l'environnement, *Poll. Atm.*, janv-mars 1998, pp.5-11
- [77] Stern A.C., *Air pollution*, vol. VI, academic Press, London, 1986.
- [78] Finlayson- Pitts B.J.F. and J.N. Pitts Jr., *Atmospheric chemistry: Fundamentals and experimental techniques*, John Wiley, New-York, 1986
- [79] Atkinson R., S.M. Aschmann and J.Arey, Formation of ring-retaining products from the OH radical-initiated of o-, m- and p- xylènes, *Int. J. Chem. Kint.*, N°23, 1991, pp.77-97
- [80] Singh H.B. and Zimmerman P.B. , *Atmospheric distribution and sources of non methane hydrocarbons in Gaseous Pollutants: characterisation and cycling*, J.O. Nriagu, John Wiley and Sons, New York, 1992, pp. 177-235
- [81] Guesten H., L. Klasinc et D. Marie, Prediction of the abiotic degradability of organic compounds in the troposphere, *J. Atmopsh. Chem.*, n°2, 1984, pp.83-93
- [82] Jori A., D. Calamari, A. Didomenico, C.L. Galli, E. Galli, M. Marinovich and V. Silano, Ecotoxicological profil of xylenes, *Ecotoxicol. Environ. Safety*, n°11, 1986, pp. 44-80.
- [83] Cocheo V., Sacco P., Boaretto C. , De Saeger E., Perez Ballesta P., Skov H., Goelen E., Gonzalez J., Baeza Carecena A., Urban benzene and population exposure, *Nature*, pp.141-142, 2000
- [84] Pennequin –Cardinal A., H. Plaisance, N. Locage, O. Ramalho, S. Kirchner and J.C.Galloo; Performances of the radiello diffusive sampler for BTEX measurements: Influence of environmental conditions and determination of modelled sampling rates, *Atm.Env.*39, 2005, pp. 2535-2544.
- [85] Bates M., Gonzalez-Flesca N., Cocheo V., Sokhi R., Ambient volatile organic compounds monitoring by diffusive sampling. Compatibility of high up samplers with thermal desorption, *Analyst*, vol.122, 1997, pp. 1481-1489
- [86] Keith L.H., *Environmental sampling and analysis, a practical guide*, Lewis Publishers, New York, 1991

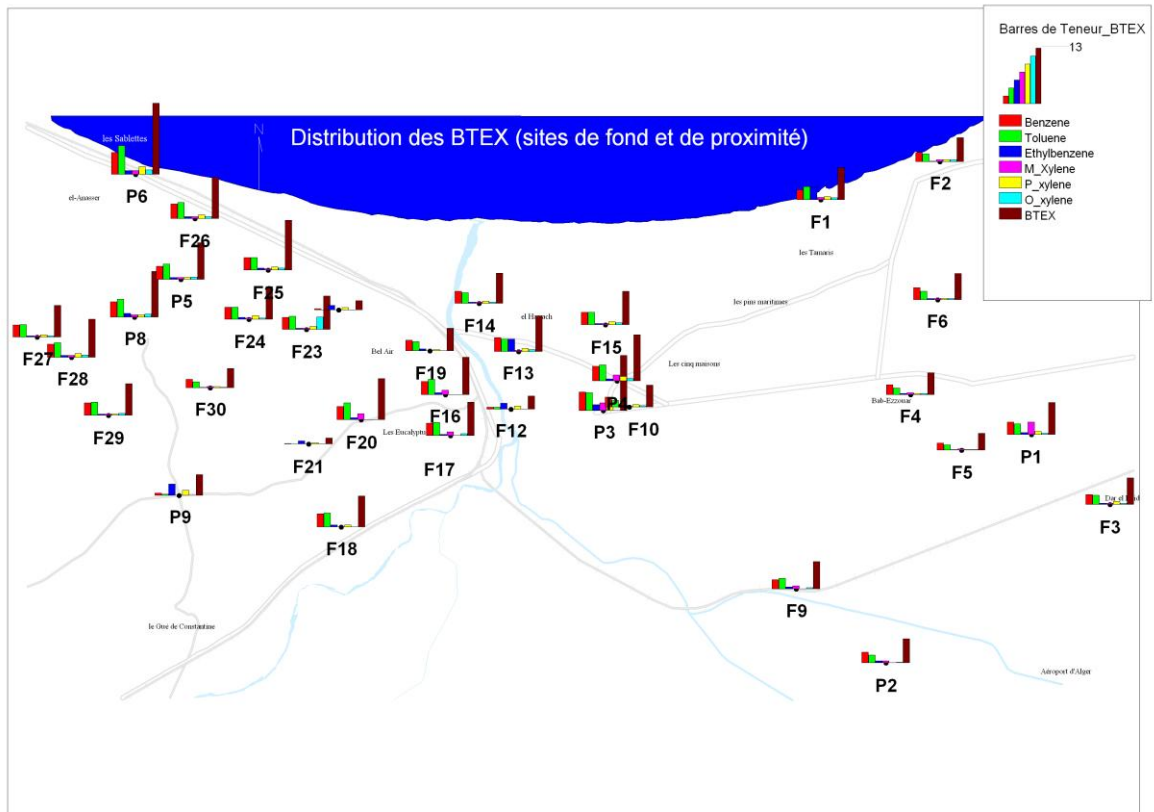
- [87] Yohansen J. Wendelkoe J.F, Dimethylformamide and Carbon disulfide desorption for organic vapors on gas-sampling charcoal tube analysis a gas chromatographic backflush technique, *J. Chromatogr.*, 217, 1981, pp.317-326
- [88] Lodge J.P, *Methods of air sampling and analysis*, Lewis Publishers, New York , 3^{es} edition, 1989
- [89] Winegar E.D., Keith L. H, *Sampling and analysis of airborne pollutants*, Lewis Publishers, New-york, 1993.
- [90] Le Cloirec P., *Les composés organiques volatils (COV) dans l'environnement*, Lavoisier, Paris, 1996
- [91] Keith L.H and M. Walker, *Handbook of air toxics, Sampling, analysis and properties*, Lewis Publishers, New-York, 1995
- [92] <http://www.radiello.com>
- [93] K, F, Ho, S.C. Lee, H. Guo, W. Y. Tsai. Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong, *Sc. Of total environment* 322 (2004) 155-166.

Annexe 1

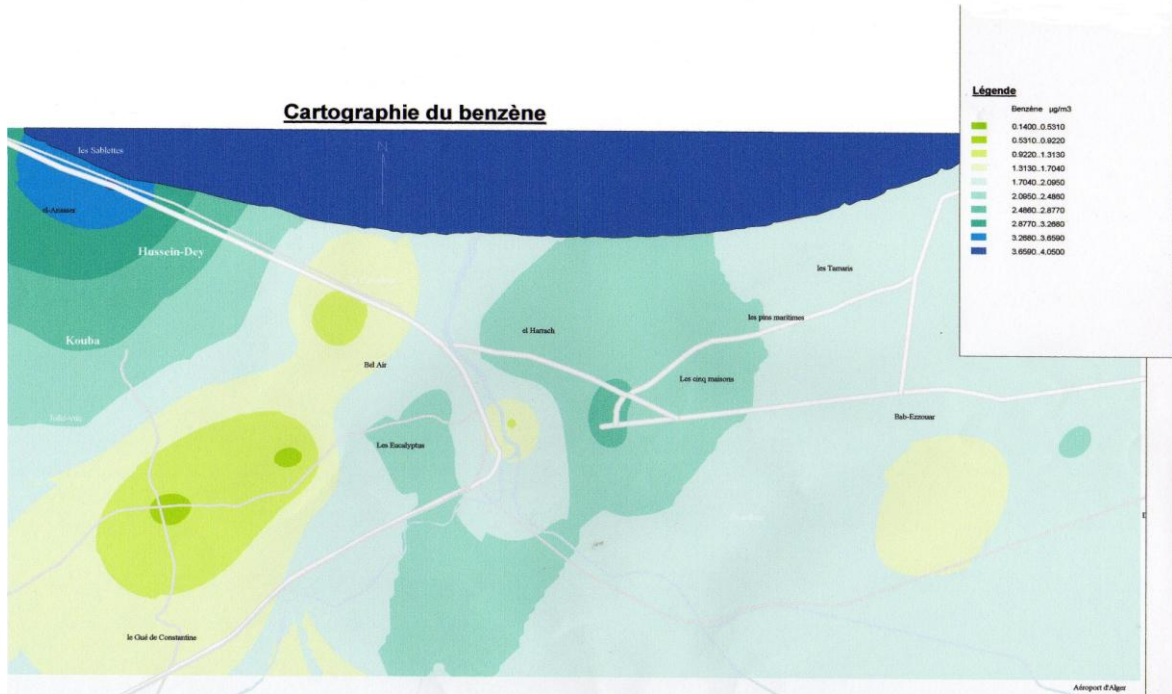




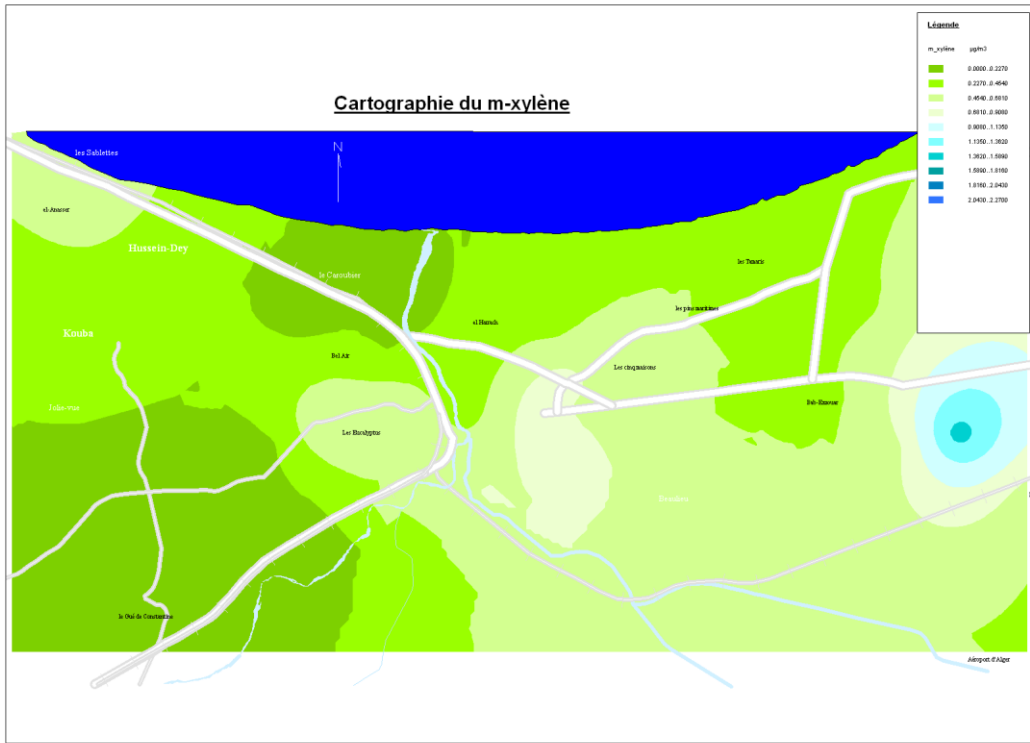
Annexe 3



Annexe 4



Annexe 7



Annexe 9

