

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
**Département du génie de l'environnement**  
Laboratoire des Sciences et des Technologies de l'Environnement (LSTE)



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

## Mémoire de Magister

Pour l'obtention du grade de

### Magister en Génie de l'environnement

Option : Génie de l'environnement

Thème :

Contribution à l'étude de la pollution de l'air  
par les composés aromatiques BTEX  
- Cartographie de la pollution à Alger -

Etudié par :

**M<sup>r</sup> KHATRAOUI Hichem**

Ingénieur d'Etat en Génie de l'Environnement USTHB

<b>Présidente du jury :</b>	HELLAL. A	Professeur	E. N. S. P
<b>Directeur de thèse :</b>	KERBACHIR	Professeur	E. N. S. P
<b>Examineurs :</b>	DOUAOUI. A	Maitre de conférences	U. Chlef
	ZEBOUDJ. S	Maitre de conférences	E. N. S. P
	NAMANE. A	Maitre de conférences	E. N. S. P

Année Universitaire 2008 – 2009

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique

10 avenue Hassen Badi – El Harrach - Alger

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents, qui m'ont montré le chemin à suivre ;*

*A ma femme Wassila, avec laquelle je le parcours ;*

*A mon fils Abdérahmane que son chemin respectif attend ;*

*A ma sœur Dalila et mon beau frère M'hamed ainsi que leur adorable  
petite fille Rania*

*Ma belle famille notamment mon beau père et ma belle mère et leurs  
enfants*

*Mes oncles Djafer, Noureddine et Djalel*

*Mes cousins Mourad, Sofiane, Mouna, Hana et Abdou.*

*Mes amis Kenza, Mahio, Mahdia, Khaled, Nacer, Rachid, Mohamed,  
Karima, Samir, Yanis et Zaki.*

*Qu'ils me pardonnent mon manque de disponibilité et mes absences.  
Que ce travail soit une part de ma reconnaissance envers vous.*

*L'équipe de bureau d'études CEGEP notamment Mr ISLI, Djamel et  
Nassima*

*La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans la  
gentillesse et la bonne humeur de l'ensemble des personnes avec  
lesquelles j'ai eu la chance de travailler, particulièrement : Nassima,  
Lila Arbia, Okba, Hanane, Mahdi, Amel, Dalila, Lila Bensahdelah et  
toute l'équipe de Génie de l'environnement.*

*A la mémoire de ma mère*

*Tout d'abord, mes remerciements sincères à Monsieur le Professeur KERBACHI R., qui m'a donné l'opportunité de faire partie de son équipe de recherche au sein du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique. Je le remercie également, pour m'avoir proposer ce sujet intéressant et d'actualité ainsi que pour ses précieuses suggestions prodiguées tout au long de la réalisation de ce travail. Je le remercie également pour ses encouragements, ses conseils pendant mes travaux de recherches et surtout pour sa gentillesse et sa compréhension.*

*Je tiens à remercier M<sup>r</sup> A.HELLAL, Professeur à l'E.N.S.P, d'avoir accepter d'être la présidente du jury.*

*Je tiens à remercier vivement M<sup>r</sup>. A. DOUAOUI, Maître de conférences, Université de Chlef, qui, malgré ses occupations, m'a fait l'honneur d'examiner mon travail.*

*Mes remerciements s'adressent également à M<sup>r</sup> A.NAMANE, Maître de conférences à l'E.N.S.P et M<sup>me</sup> S. ZABOUDJ, Maître de conférences à l'E.N.S.P, pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de l'examiner.*

*Je remercie vivement Monsieur KERCHICHE Y. pour sa disponibilité, ses conseils et surtout pour sa patience. Qu'il trouve ici mes meilleurs remerciements et l'expression de mon profond respect.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à M<sup>me</sup> N.ABOUN pour sa précieuse aide.*

*Mes remerciements s'adressent également à :*

*\* HAMIDA et MAHFOUD pour leurs gentillesse et leurs aides.*

*\*L'équipe de laboratoire de recherche « eau et sol »l de l'université de Chlef notamment*

*M<sup>r</sup>. A. DOUAOUI et M<sup>r</sup> A. Bradai*

*\* M<sup>elle</sup> HADIDI Djahida (Université de Chlef)*

*\* M<sup>r</sup> CHEKOMBOU (Académie d'Alger)*

*\*M<sup>r</sup> Lalleg (Agence Nationale des Déchets AND)*

*Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance, mes meilleurs remerciements et l'expression de mon profond respect*

## SOMMAIRE

<b>I. INTRODUCTION</b> .....	1
<b>II. GENERALITE SUR LA POLLUTION DE L’AIR PAR LES BTEX</b> .....	3
II.1. Compositions De L’atmosphère et définition de la pollution de l’air.....	3
II.2. La pollution de l’air par les BTEX.....	5
II.2.1. Généralités sur les BTEX.....	5
II.2.2. Toxicologie des BTEX.....	8
II.2.2.1 Toxicocinétique du Benzène.....	9
II.2.2.2 Mécanisme d’action toxique.....	9
II.2.2.3. Etiologie et symptomatologie des intoxications.....	10
II.2.2.4. Toxicocinétique du toluène, éthylbenzène et les xylènes.....	12
II.2.3. Transformations chimiques des BTEX dans la troposphère.....	14
II.2.4. Les techniques de prélèvement dans l’air ambiant et d’analyses des BTEX.....	15
II.2.5. Analyse des échantillons.....	17
<b>III. ANALYSE GEOSTATISTIQUE</b> .....	17
III.1. Analyse de la structure spatiale (variographie).....	19
III.1.1 Rappel statistique de base.....	19
III.1.2. Le variogramme.....	20
III.2. Le krigeage.....	29
III.2.1 Différents type de krigeage.....	30
III.3. La cartographie.....	32
<b>IV. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE</b> .....	33
IV.1. Les tubes à diffusion « Radiello <sup>®</sup> » .....	33
IV.2. Analyse des échantillons.....	35

IV.2.1. Désorption.....	35
IV.2.2. Conditions opératoires.....	35
IV.3. Zone d'étude.....	36
IV.3.1. Description de la zone d'étude.....	36
IV.3.2. Choix des sites et campagnes de mesure.....	42
<b>V. RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>48</b>
V.1. Teneurs en BTEX.....	48
V.1.1. Temps de rétention des BTEX.....	48
V.2. Variation saisonnière des BTEX.....	51
V.3. Comparaison inter-communes des niveaux de pollution par les BTEX.....	53
V.4. Corrélations entre les polluants.....	58
V.5. Cartographie de la distribution de la pollution par les BTEX.....	65
V.6. Comparaison des niveaux de pollution aux normes et situation par rapport à d'autres villes.....	79
V.7. Exploitation Google Earth.....	81
<b>VI. CONCLUSION.....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>84</b>

## **Annexes**

## Liste des Tableaux

<b>Tableau n°1</b> : Caractéristiques des principaux constituants chimiques gazeux de l’atmosphère.....	4
<b>Tableau n°02</b> : Répartition de la population et de la superficie par commune.....	38
<b>Tableau n°03</b> : Kilométrage et densité des routes par commune.....	41
<b>Tableau n°04</b> : Etat de stations de service en carburant.....	43
<b>Tableau n°05</b> : Etat des forêts des communes de la zone d’étude.....	44
<b>Tableau n°06</b> : Emplacement des tubes échantillonneurs.....	46
<b>Tableau n°07</b> : Temps de rétention des BTEX.....	48
<b>Tableau n°08</b> : Teneurs atmosphériques en BTEX mesurées en sites de fond urbains en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	49
<b>Tableau n°09</b> : Teneurs atmosphériques en BTEX mesurées en sites de proximité automobile en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	50
<b>Tableau n°10</b> : Teneurs moyennes et extrêmes des BTEX mesurées en sites de fond urbains en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	50
<b>Tableau n°11</b> : Teneurs moyennes et extrêmes des BTEX mesurées en sites de proximité automobile en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	50
<b>Tableau n°12</b> : Rapport $\text{BTEX}_{\text{proximité}}/\text{BTEX}_{\text{urbain}}$ .....	52
<b>Tableau n°13</b> : Comparaison été-hiver des teneurs moyennes des BTEX en sites urbains de fond en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	52
<b>Tableau n°14</b> : Comparaison été-hiver des teneurs moyennes des BTEX en sites de proximité en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	52
<b>Tableau n°15</b> : Comparaison été-hiver des teneurs moyennes des BTEX pour l’ensemble des sites en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	53
<b>Tableau n°16</b> : Rapport $\text{BTEX}_{\text{Hivernale}}/\text{BTEX}_{\text{Estivale}}$ .....	53
<b>Tableau n°17</b> : Matrice des facteurs des corrélations $R^2$ des BTEX (site de fond) en période Estivale.....	62

<b>Tableau n°18 :</b> Matrice des facteurs des corrélations $R^2$ des BTEX (site de fond) en période Hivernale.....	62
<b>Tableau n°19 :</b> Matrice des facteurs des corrélations $R^2$ des BTEX (Sites de proximité) en période Estivale.....	62
<b>Tableau n°20 :</b> Matrice des facteurs des corrélations $R^2$ des BTEX (Sites de proximité) en période Hivernale.....	63
<b>Tableau 21 :</b> Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux.....	67
<b>Tableau n°22 :</b> Teneurs des BTEX enregistrés dans quelques villes de monde en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	79

## Liste des Figures

<b>Figure n°01</b> : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre.....	3
<b>Figure n°02</b> : Principales sources d'émissions de BTEX.....	6
<b>Figure n°03</b> : Métabolisme de benzène chez l'homme .....	11
<b>Figure n°04</b> : Métabolisme de toluène chez l'homme .....	12
<b>Figure n°05</b> : Métabolisme de l'o-xylène chez l'homme.....	13
<b>Figure n°06</b> : Cycle de chapman.....	14
<b>Figure n°07</b> : Modification du cycle de Chapman.....	14
<b>Figure n°08</b> : Principe du tube actif.....	15
<b>Figure n°09</b> : Principe du tube passif axial.....	16
<b>Figure n°10</b> : Principe du tube passif radial.....	16
<b>Figure n°11</b> : modèle d'un variogramme.....	21
<b>Figure n°12</b> : Comportement à l'origine des différents variogrammes.....	23
<b>Figure n°13</b> : Principaux modèles de variogrammes utilisés.....	25
<b>Figure n°14</b> : Modèles croissants d'ajustement .....	27
<b>Figure n°15</b> : Modèles d'ajustement aux variogrammes bornés .....	27
<b>Figure n°16</b> : Variogrammes directionnels selon les quatre principales directions.....	28
<b>Figure n°17</b> : Variogramme surfacique montrant la présence d'une anisotropie selon une direction principale.....	29
<b>Figure n°18</b> : Localisation des communes de la zone d'étude.....	36
<b>Figure n°19</b> : Carte de densité de population.....	37
<b>Figure n°20</b> : Températures moyennes d'Alger.....	38
<b>Figure n°21</b> : Précipitation annuelle de la zone côtière Alger et environs.....	39
<b>Figure n°22</b> : Rose des vents annuelle d'Alger.....	39
<b>Figure n°23</b> : Répartition du parc automobile selon le carburant utilisé.....	40
<b>Figure n°24</b> : Répartition du parc automobile selon l'âge.....	41
<b>Figure n°25</b> : Image Google donnant la position des postes de mesure dans le Grand-Alger.....	46
<b>Figure n°26</b> : Localisation des postes de mesures sur la zone d'étude .....	47
<b>Figure n°27</b> : Chromatogramme CPG des BTEX mesurés à Didouche Mourad P17.....	48
<b>Figure n°28</b> : Teneurs atmosphériques moyennes en benzène par commune.....	54

<b>Figure n°29:</b> Teneurs atmosphériques moyenne en toluène par commune.....	54
<b>Figure n°30:</b> Teneurs atmosphériques moyennes en éthylbenzène par commune.....	55
<b>Figure n°31:</b> Teneurs atmosphériques moyennes en p-xylène par commune.....	55
<b>Figure n°32:</b> Teneurs atmosphériques moyennes en m-xylène par commune.....	56
<b>Figure n°33:</b> Teneurs atmosphériques moyennes en o-xylène par commune.....	56
<b>Figure n°34:</b> Teneurs atmosphériques moyennes en total BTEX par commune.....	57
<b>Figure n°35:</b> Teneurs atmosphériques saisonnières en benzène par commune.....	57
<b>Figure n°36:</b> Teneurs atmosphériques saisonnières en total BTEX par commune.....	58
<b>Figure n°37 :</b> Corrélacion benzène/toluène en sites urbains.....	60
<b>Figure n°38 :</b> Corrélacion benzène/toluène en sites de proximité.....	60
<b>Figure n°39 :</b> Corrélacion toluène/m-xylène en sites urbains.....	61
<b>Figure n°40:</b> Corrélacion toluène/BTEX totaux en sites urbains.....	61
<b>Figure n°41:</b> Corrélacion m-xylène/BTEX totaux en sites urbains.....	62
<b>Figure n°42 :</b> Corrélacion toluène /m-xylène en sites de proximité.....	62
<b>Figure n°43 :</b> Corrélacion toluène/BTEX totaux en sites de proximité.....	63
<b>Figure n°44:</b> Corrélacion m-xylène/BTEX totaux en sites de proximité.....	63
<b>Figure n°45 :</b> Variogramme surfacique de benzène.....	65
<b>Figure n°46 :</b> Variogramme surfacique de toluène.....	66
<b>Figure n°47 :</b> Variogramme surfacique de total BTEX totaux.....	66
<b>Figure n°48 :</b> Variogramme expérimental de benzène moyen.....	67
<b>Figure n°49 :</b> Variogramme expérimental de toluène moyen.....	67
<b>Figure n°50 :</b> Variogramme expérimental des BTEX totaux.....	68
<b>Figure n°51 :</b> Carte de distribution du benzène (été).....	69
<b>Figure n°52 :</b> Carte de distribution benzène (hiver).....	70
<b>Figure n°53 :</b> Carte de distribution benzène (annuelle).....	71
<b>Figure n°54 :</b> Carte de distribution toluène (été).....	72
<b>Figure n°55 :</b> Carte de distribution toluène (hiver).....	73
<b>Figure n°56 :</b> Carte de distribution toluène (annuelle).....	74
<b>Figure n°57:</b> Carte de distribution totale BTEX totaux (été).....	75
<b>Figure n°58 :</b> Carte de distribution totale BTEX totaux (hiver).....	76
<b>Figure n°59 :</b> Carte de distribution BTEX totaux (annuelle).....	77

**Figure n°60:** Exemple de visualisation des paramètres de pollutions en un site de proximité automobile..... 81

## I. INTRODUCTION

Plusieurs études effectuées dans divers régions du monde ont montré que le trafic routier constitue l'une des principales causes de la pollution de l'air ambiant [1, 2, 3].

Les gaz d'échappement dus à la combustion incomplète ainsi que l'évaporation des carburants essence et diesel issue des véhicules et des stations services, sont la source d'une forte émission de composés organiques volatils (COV) qui ont un impact sur l'homme et l'environnement.

Les COV renferment une forte proportion en hydrocarbures aromatiques monocycliques parmi lesquels on trouve le benzène et ces homologues supérieurs toluène, éthylbenzène et xylène, désignés le plus souvent par le terme BTEX.

De nombreuses études épidémiologiques et toxicologiques ont prouvé la nature dangereuse du benzène [4,5,6]. Il est considéré comme étant un composé cancérigène. De part leur réactivité dans l'atmosphère, les BTEX jouent aussi un rôle de précurseur de l'ozone photochimique [7].

Le développement socio-économique qu'a connu le pays ces dernières années et l'amélioration du mode de vie de la population, ont induit une forte croissance du parc automobile qui a dépassé les trois millions de véhicules à la fin de l'année 2005 dont 23% sont immatriculés dans l'agglomération d'Alger [8]. Le nombre de véhicules circulant dans la capitale est de l'ordre d'un million de véhicule par jour et atteindrait quatre millions en 2020 [9].

Ce parc automobile est malheureusement très âgé. Plus de 60% des véhicules ont plus de 20 ans. Cette situation engendre une certaine dégradation de la qualité de l'air par des émissions de plus en plus importantes de composés aromatiques toxiques.

L'air est indispensable à tous les êtres vivants et quand on considère que l'homme (adulte) en inhale de 12 à 15 m<sup>3</sup> par jour, on conçoit que le maintien de sa qualité naturelle figure au premier plan de nos préoccupations.

La connaissance de l'impact de cette pollution nécessite dans un premier temps une évaluation de son ampleur et sa répartition spatiale.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre présente étude qui fait partie d'un vaste programme de recherche sur la pollution atmosphérique en milieu urbain. Nous nous intéressons, en particulier, à l'évaluation spatiale et temporelle de la pollution par les BTEX à Alger.

Deux campagnes d'échantillonnage (été et hiver) ont été réalisées sur une zone englobant quinze communes de l'Ouest et du Centre d'Alger. On utilise le mode des tubes d'échantillonnage passif qui contrairement à l'échantillonnage dynamique, permet de réaliser simultanément un grand nombre de mesures sur des zones très vastes. A partir des résultats et utilisant la technique de la géostatistique, nous élaborerons la cartographie de la pollution par les BTEX à Alger.

## II. GENERALITES SUR LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES BTEX

### II.1. Compositions de l'atmosphère et définition de la pollution de l'air

L'atmosphère est la couche d'air qui entoure la terre. Elle est composée de quatre couches :

- **La troposphère** : on trouve cette première couche jusqu'à une altitude de 10 km de la surface. Elle est caractérisée par la décroissance de la température avec l'altitude de 6 à 7°C en moyenne par kilomètre et représente 80 à 85 % de la masse de l'atmosphère.
- **La stratosphère** : elle s'étend jusqu'à 50 km. Contrairement à la troposphère, la température augmente avec l'altitude, en raison de l'interception du rayonnement solaire par les molécules d'ozone
- **La mésosphère** : elle se trouve entre 50 et 85 km d'altitude
- **La thermosphère** : c'est la dernière couche qui se trouve à une altitude au dessus de 85 km.

Au-delà, la force d'attraction de la terre est négligeable et dans l'exosphère (au delà de 400 à 500 km), l'hydrogène atomique peut s'échapper vers l'espace [10].

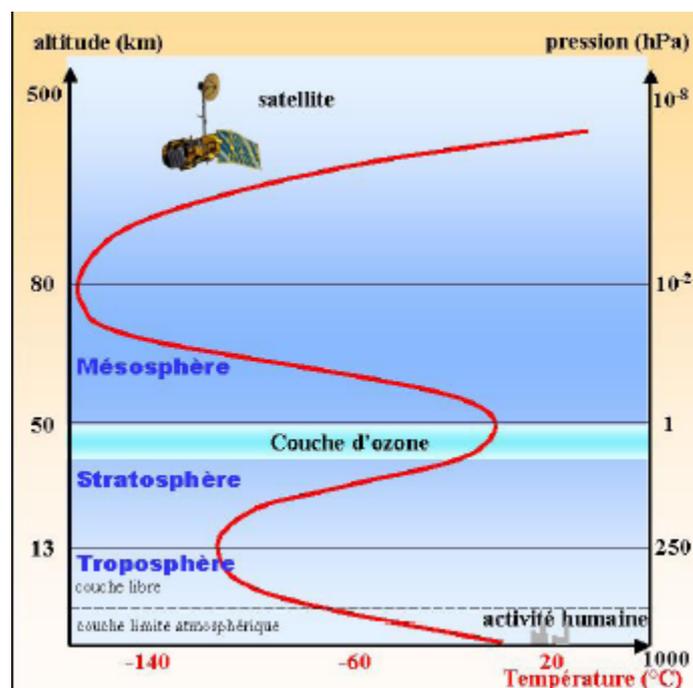


Figure n°01 : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre

La troposphère est la zone qui nous intéresse le plus dans notre présente étude, vu qu'elle est le lieu principale de la pollution atmosphérique [11].

L'air est dit pur, lorsqu'il ne contient pas de substances autres que celles qui entrent dans sa composition naturelle, le tableau n°01 nous donne les caractéristiques des principaux constituants chimiques gazeux de l'atmosphère [11].

**Tableau n°1 : Caractéristiques des principaux constituants chimiques gazeux de l'atmosphère [11]**

constituant	Formule chimique	Masse moléculaire	Pourcentage en volume par rapport à l'air sec ( $10^{-2}v/v$ )	Masse totale dans l'atmosphère (g)	Temps de résidence moyen dans l'atmosphère
Atmosphère totale				$5,136 \cdot 10^{21}$	
Air sec		28,9644	100,0	$5,119 \cdot 10^{21}$	
Vapeur d'eau	H <sub>2</sub> O	18,0153	Variable	$0,017 \cdot 10^{21}$	6 à 15 jours
Azote	N <sub>2</sub>	28,0340	78,084	$3,866 \cdot 10^{21}$	$15 \cdot 10^6$ ans
Oxygène	O <sub>2</sub>	31,9988	20,948	$1,185 \cdot 10^{21}$	$8 \cdot 10^3$ ans
Argon	Ar	39,9480	0,934	$6,59 \cdot 10^{19}$	Infini
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	44,0099	0,0370	$2,72 \cdot 10^{18}$	15 ans
Néon	Ne	20,1830	$1,818 \cdot 10^{-3}$	$6,48 \cdot 10^{16}$	Infini
Hélium	He	4,0026	$1,818 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{185}$	Infini
Méthane	CH <sub>4</sub>	16,0430	$\approx 1,7 \cdot 10^{-4}$	$\approx 4,3 \cdot 10^{15}$	9 ans
Hydrogène	H <sub>2</sub>	2,0159	$\approx 5,0 \cdot 10^{-5}$	$\approx 1,8 \cdot 10^{14}$	10 ans
Protoxyde d'azote	N <sub>2</sub> O	44,0128	$\approx 3,1 \cdot 10^{-5}$	$\approx 2,3 \cdot 10^{15}$	150 ans
Monoxyde de carbone	CO	28,0106	$\approx 1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{14}$	2 mois
Ozone	O <sub>3</sub>	47,9982	$2-200 \cdot 10^{-6}$	$\approx 3,3 \cdot 10^{15}$	1 à 2 mois
Ammoniac	NH <sub>3</sub>	17,0306	$\approx 0,1 \text{ à } 1 \cdot 10^{-6}$	$\approx 3,0 \cdot 10^{13}$	20 jours
Dioxyde d'azote	NO <sub>2</sub>	46,0055	$\approx 1 \cdot 10^{-7}$	$\approx 8 \cdot 10^{12}$	1 jour
COV (composés organiques volatils)	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>	variable	$\approx 0,1 \text{ à } 1 \cdot 10^{-6}$	$\approx 10^{14}$	Heures-jours
Dioxyde de soufre	SO <sub>2</sub>	64,063	$\approx 2 \cdot 10^{-8}$	$\approx 2,3 \cdot 10^{12}$	1 jour
Sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S	34,080	$\approx 2 \cdot 10^{-8}$	$\approx 1,2 \cdot 10^{12}$	1 jour

La composition de l'air n'est pas la même en tous les points ni au cours du temps, elle dépend de plusieurs facteurs dont :

- L'altitude
- La période prise en compte pendant la journée
- Le domaine concerné (mer, terre, zone rurale, zone urbaine...etc)

Plusieurs définitions ont été attribuées au terme « pollution atmosphérique » :

Dans son rapport du 14 Septembre 1967, le conseil de l'Europe 'CE' adopte la définition suivante :  
 « Il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses constituants est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer une gêne » [12].

Une autre définition est donnée par la Communauté Economique Européenne en 1984 qui définit la pollution de l'air comme suit :

« L'introduction dans l'atmosphère par l'homme directement ou indirectement de substance ou d'énergie ayant une action nocive, de nature à mettre en danger la santé de l'homme, à endommager les ressources biologiques et les écosystèmes, à détériorer les biens matériels et à porter atteinte ou à nuire aux valeurs d'agrément et autres utilisations légitimes de l'environnement »[13].

En Algérie, la pollution atmosphérique est définie, dans l'article n°03 de la loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, comme suit :

« **Pollution de l'atmosphère** : L'introduction de toute substance dans l'air ou l'atmosphère provoquée par l'émanation de gaz, de vapeurs, de fumées ou de particules liquides ou solides susceptible de porter préjudice ou de créer des risques au cadre de vie, santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agroalimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites»[14].

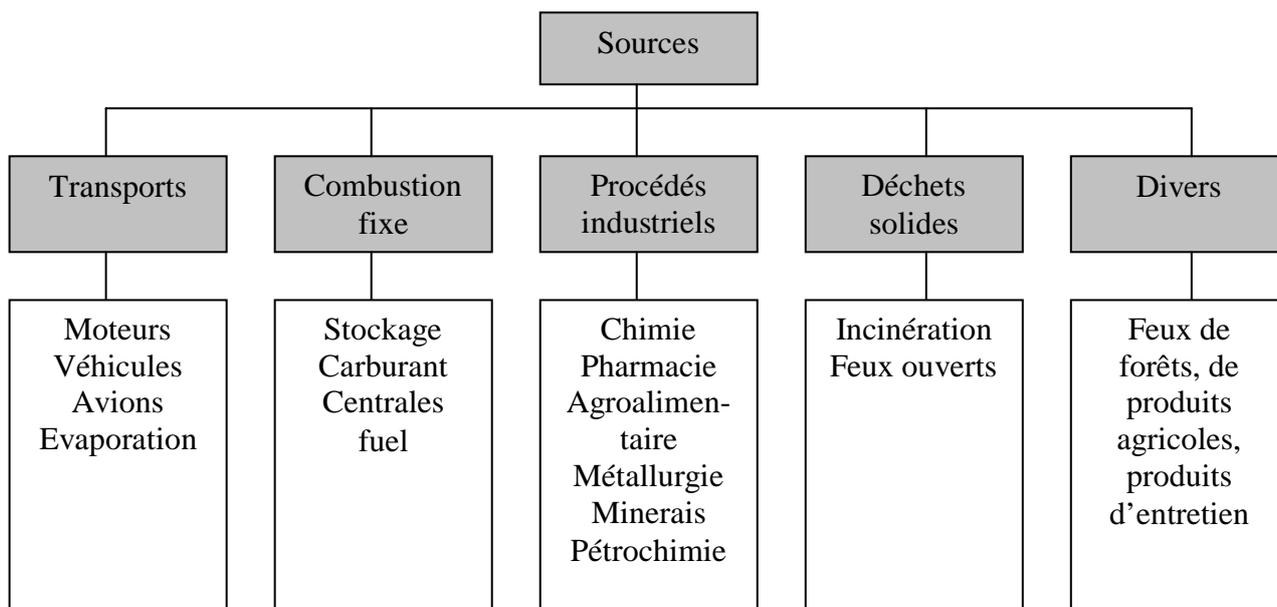
## **II.2 La pollution de l'air par les BTEX**

### **II.2.1 Généralités sur les BTEX**

Les BTEX sont des polluants de type anthropique provenant des activités humaines suivantes :

- Les industries pétrolières ;
- Les industries chimiques et utilisations de solvants ;
- Le secteur du transport.

La figure n°02 résume les principales sources d'émission des BTEX [15].



**Figure n°02:** Principales sources d'émissions de BTEX

### a) Benzène

Le benzène ( $C_6H_6$ ) est un liquide volatil, avec une odeur aromatique. En fonction de l'environnement, du climat et de la concentration d'autres polluants, sa durée de vie dans l'atmosphère varie de quelques heures à quelques jours. La réaction avec les radicaux d'hydroxyle est sa voie de dégradation la plus importante mais il peut être aussi lessivé de l'air par la pluie (légèrement soluble dans l'eau) [16].

La présence de benzène dans l'environnement est naturelle (feux de forêts, activité volcanique) ou anthropique [17]. Il peut être émis lors de la synthèse chimique d'hydrocarbures aromatiques substitués (éthylbenzène, phénol, cyclohexane...), par les fours de cokerie et la combustion du bois et d'énergies fossiles. Outre ces sources industrielles, le benzène est présent naturellement dans le pétrole brut et l'essence. Les sources majeures d'émission sont les gaz d'échappement automobile mais également l'évaporation de l'essence pendant son stockage, son transport et sa distribution [18, 19].

## **b) Toluène**

C'est l'hydrocarbure le plus abondant dans la troposphère. Sa réaction avec les radicaux hydroxyles est le mécanisme principal de sa destruction (durée de vie de plusieurs jours l'été à plusieurs mois l'hiver) [16].

Le toluène est produit principalement par la conversion catalytique du pétrole, l'aromatisation d'hydrocarbures aliphatiques et par les fours de cokerie. Il a plusieurs usages industriels (peinture, caoutchouc, imprimerie, cosmétique, adhésifs et résines, réactif pour synthèse d'autres produits chimiques, constituant de carburants). Outre ces sources industrielles il est également présent dans de nombreux produits ménagers (à des taux moyens de 12%). La plus grande source d'émission est l'usage d'essence. Les usages domestiques de peintures, diluant et la fumée de cigarette représentent les sources principales de toluène dans les environnements intérieurs [16].

## **c) Ethylbenzène**

L'éthylbenzène ( $C_2H_5-C_6H_5$ ) est un liquide sans couleur qui sent comme l'essence, il s'évapore à la température ambiante. Il se dégrade par réaction photochimique dans l'atmosphère (demi-vie de 5,5 heures en été et 24 heures en hiver) [16].

L'éthylbenzène est présent naturellement dans le goudron, le charbon et le pétrole. Il est utilisé comme réactif de synthèse (styrène principalement), comme dissolvant et entre dans la composition de l'asphalte et des carburants (l'essence contient environ 2% d'éthylbenzène en poids). Les produits de consommation contenant de l'éthylbenzène sont les pesticides, les colles de moquette, les vernis, les peintures et le tabac [16].

## **d) Xylène**

Le xylène avec ses trois isomères méta, ortho et para s'évapore et brûle facilement, il est peu soluble dans l'eau. Le xylène peut être dégradé par photo oxydation dans l'atmosphère (demi-vie de 0,4 à 1 jour) [16].

Les xylènes ne sont pas présents naturellement dans l'environnement, excepté dans la fumée des feux de forêt. Les sources anthropiques de xylènes sont le raffinage du pétrole et l'utilisation de dissolvants. Ils sont également présents dans les gaz d'échappement automobile et sont émis par évaporation pendant le transport et la distribution d'essence. Les biogaz issus de la décomposition de déchets industriels et municipaux peuvent contenir également des xylènes [16].

## II.2.2 Toxicologie des BTEX

Le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) de Lyon, agence fonctionnant sous l'égide de l'OMS et regroupant des experts internationaux, a pu définir sur le plan du pouvoir cancérigène 5 groupes de substances chimiques ou procédés [20] :

- **groupe 1** : agents cancérigènes pour l'homme ;
- **groupe 2A** : agents probablement cancérigènes pour l'homme ;
- **groupe 2B** : agent pouvant être cancérigènes pour l'homme ;
- **groupe 3** : agents ne pouvant être classés du point de vue de leur cancérigénicité pour l'homme ;
- **groupe 4** : agents probablement non cancérigènes pour l'homme.

La première confirmation de la relation entre l'exposition au benzène et le cancer de sang date de 1928 [21]. Depuis, plusieurs études toxicologiques et épidémiologiques ont montré les effets du benzène sur l'être humain et les animaux [22-26]. Il est classé depuis 1987 dans le groupe 1 par le CIRC [27]. De plus, il peut aboutir à une anémie aplasique et comme beaucoup de substances génotoxiques, il semble diminuer les défenses immunitaires, ce qui est néfaste pour le long terme [28].

Le benzène atteint la moelle osseuse chez les animaux et chez l'homme en provoquant au bout d'un certain temps d'exposition une baisse progressive des lignées sanguines. Il diminue les taux circulants d'érythrocytes et de thrombocytes et peut entraîner chez l'homme une aplasie médullaire avec hémorragies ou, plus tardivement, des cas de leucémies [20].

Pour évaluer le risque cancérigène 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). Il existe plusieurs valeurs de RU qui dépendent de l'organisme émetteur. On peut citer comme exemple l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) qui fixe la valeur guide relative à la qualité de l'air émise à :

$$RU = 6 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad [29, 30]$$

Cela signifie que pour une exposition vie entière à une unité de dose de benzène, soit  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tout individu a de  $6 \times 10^{-6}$  chance supplémentaire de développer un cancer .

La Communauté Européenne a fixé un seuil-limite pour le benzène qui s'élève en moyenne annuelle à  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . L'objectif de qualité de l'air est de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [31].

En Algérie, le benzène n'est pas réglementé. Le décret exécutif n°06-02 du 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, n'a pas donné une valeur limite ou un objectif de qualité de l'air pour le benzène [32].

### **II.2.2.1 Toxicocinétique du Benzène [20]**

#### **a) Absorption**

La principale voie de pénétration dans l'organisme est la voie pulmonaire, qui concerne de 30 à 80% de la quantité inhalée. La voie transcutanée peut aussi être incriminée à la faveur du port de vêtements souillés, du lavage des mains à l'essence ou de projections. La voie digestive est exceptionnelle ; elle concerne les ingestions accidentelles ou volontaires.

#### **b) Distribution**

Au niveau sanguin le benzène absorbé est fixé aux lipoprotéines plasmatiques et aux hématies. Sa lipophilie entraîne une distribution rapide dans les tissus et organes riches en graisses : système nerveux, moelle osseuse, foie, surrénales, etc. La fixation dans le tissu nerveux est prédominante dans les intoxications aiguës ; elle est surtout hépatique dans les intoxications chroniques.

#### **c) Elimination**

On admet que 50% environ de benzène introduit dans l'organisme par voie respiratoire se retrouvent sous forme inchangée dans l'air expiré. Cette élimination se poursuit pendant au moins 24 heures après l'exposition.

Parmi les produits éliminés dans l'urine, le benzène, les phénols 30 à 40% (la majeure partie sous forme de sulfoconjugués), l'acide muconique moins de 1%, l'acide phénylmercapturique également moins de 1% (ces divers composés résultent du métabolisme du benzène absorbé).

### **II.2.2.2 Mécanisme d'action toxique**

Le benzène, en raison de sa lipophilie, exerce une action dépressive sur le système nerveux central, aboutissant à la narcose dans les intoxications aiguës.

Les tissus hématopoétiques sont atteints, avec pancytopénie, par les méthodes intermédiaires réactives du benzène, plus particulièrement lors de l'intoxication chronique.

L'activation métabolique, avec au départ la formation d'époxybenzène, peut conduire à des composés génotoxiques, capables de donner des adduits avec l'ADN des cellules en cours de reproduction, probablement mis en cause dans les anémies aplasiques et les leucémies benzéniques.

Le benzène a encore une activité cancérogène, une activité inductrice sur les mono-oxygénases Cytochrome P450 dépendantes et inhibitrice sur d'autres enzymes (phosphates alcalines, peroxydases et catalases érythrocytaires, acide delta-aminolévulinique synthétase) et un effet immunosuppresseur. La figure n°3 résume le métabolisme du benzène chez l'homme [20].

Il peut traverser la barrière placentaire et exercer sa toxicité sur le fœtus, mais ne semble pas être tératogène.

### **II.2.2.3 Etiologie et symptomatologie des intoxications**

#### **a) Intoxications aiguës**

Les intoxications aiguës au benzène sont rares et surtout accidentelles. Elles peuvent se produire par suite de manipulations ou emplois industriels défectueux, de rupture de conteneurs ou réacteurs, etc. l'inhalation du toxique va alors provoquer selon les doses :

- une simple ébriété ;
- de la somnolence ;
- des convulsions ;
- un coma qui peut être mortel par collapsus cardiaque.

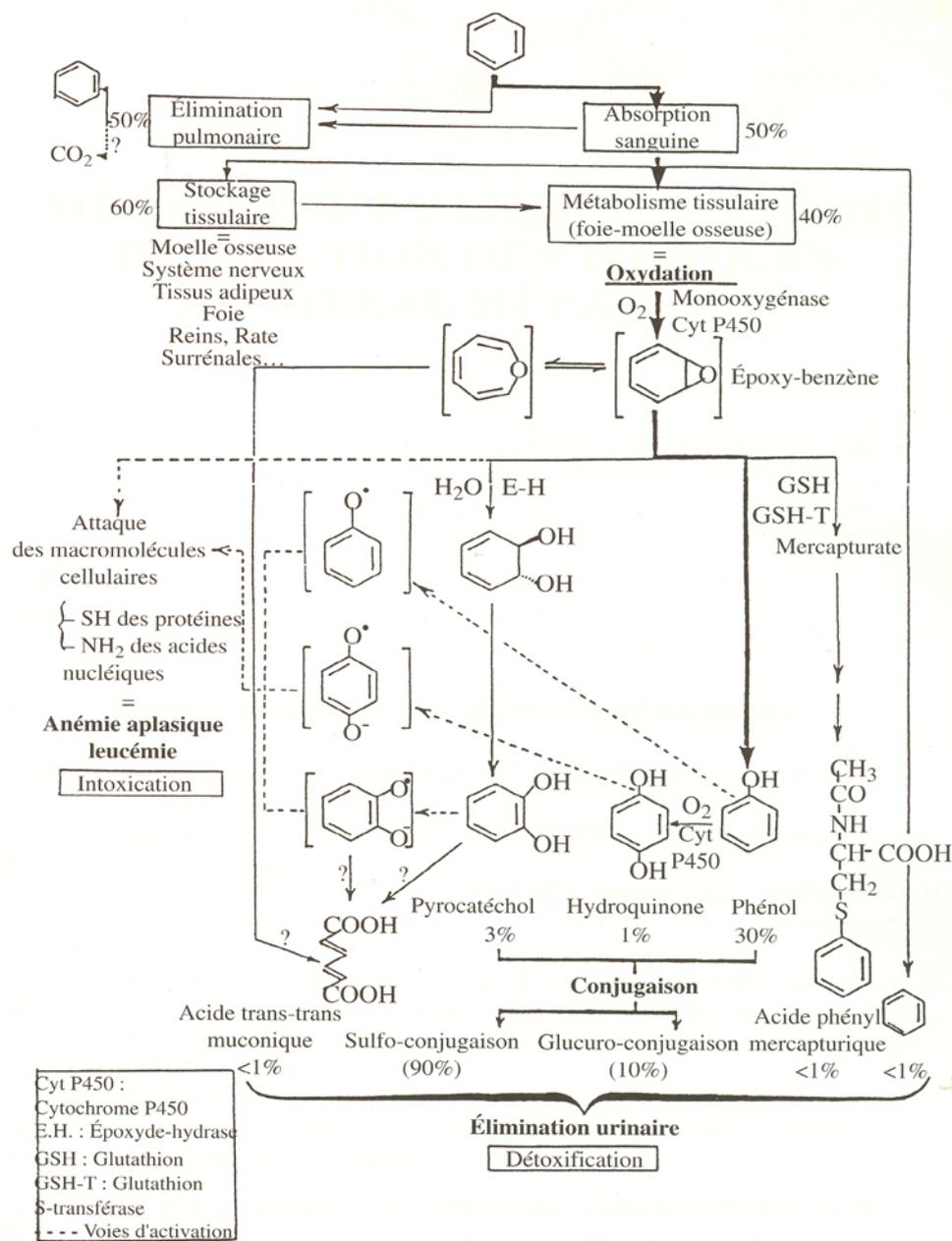
L'ingestion entraîne des troubles digestifs, des troubles neurologiques et une pneumopathie d'inhalation, résultant de l'envahissement des voies respiratoires par le benzène et aggravée par les vomissements éventuels.

#### **b) Intoxication chronique**

L'exposition répétée aux vapeurs de benzène, d'origine professionnelle ou autre, peut d'abord se manifester par des troubles neuropsychiques : irritabilité, baisse des capacités de concentration et de mémorisation, syndrome dépressif, troubles du sommeil. Mais ce sont les effets hématopoétiques qui dominent. L'effet dépresseur sur la moelle osseuse est dose-dépendant et cumulatif ; il apparaîtrait pour des expositions supérieures ou égales à 30-50 ppm de benzène dans l'air. L'aplasie médullaire, avec hémorragies, infections et myélogramme pauvre, voire désertique, est classique.

Au bout de quelques mois à quelques années après le début de l'exposition, on observe une baisse progressive des lignées sanguines : la thrombopénie est précoce, elle est suivie de leucopénie, puis parfois d'une anémie ou d'une leucocytose. Ces anomalies peuvent régresser à l'arrêt de l'exposition. On peut ensuite voir apparaître un syndrome myéloprolifératif, avec risque de thromboses et d'hémopathie maligne.

Les leucémies ont un délai d'apparition variable (parfois des années) ; toutes les formes histologiques sont possibles.



Métabolisme du benzène chez l'homme.

Figure n°03 : Métabolisme de benzène chez l'homme [20]

#### II.2.2.4 Toxicocinétique du toluène, éthylbenzène et les xylènes [20]

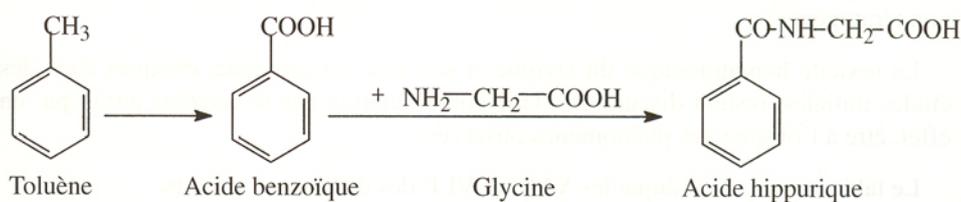
La pénétration des hydrocarbures aromatiques dans l'organisme se fait le plus souvent par voie pulmonaire. La pénétration cutanée est également possible.

Ces hydrocarbures subissent, essentiellement au niveau du foie, un métabolisme oxydatif sous l'influence des mono-oxygénases à Cytochrome P450 du réticulum endoplasmique. L'oxydation porte surtout sur la chaîne latérale fixée au noyau aromatique, l'oxydation en phénols et minime. Contrairement à ce qui a lieu pour le benzène :

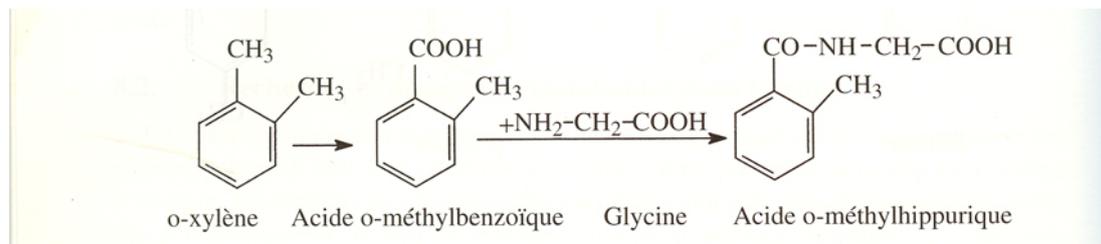
- le toluène est pour 80% oxydé en acide benzoïque, qui se conjugue à la glycine pour former de l'acide hippurique éliminé dans les urines (figure n°04); une faible fraction est oxydée en crésols, excrétés sous forme sulfo- et glucuronoconjuguée dans les urines :
- les xylènes sont métabolisés pour 90% en acides méthybenzoïques qui, conjugués à la glycine, fournissent des acides méthylhippuriques ; l'oxydation avec formation des xylénols est de faible importance (figure n°05).
- l'éthylbenzène est éliminé sous forme d'acide hippurique, d'acide mandélique ( $C_6H_5-CHOH-COOH$ )

L'intoxication chronique se caractérise par de l'asthénie, des céphalées, de la nervosité, des irritations (nasales, bronchiques, etc.) et des dermatoses. L'atteinte hépatique et rénale a été décrite chez les toxicomanes inhalants du toluène ou des xylènes, une élévation des transaminases a été exceptionnellement rapportée chez des populations exposées.

Ces solvants traversent la barrière placentaire : ils sont toxiques pour les fœtus mais non tératogènes.



**Figure n°04 : Métabolisme de toluène chez l'homme**



**Figure n°05:** Métabolisme de l'o-xylène chez l'homme

Par inhalation, des expositions au toluène comprises entre 281 et 562 mg/m<sup>3</sup> induisent des maux de tête, des vertiges, des muqueuses irritées et une somnolence [33].

Le toluène n'est pas soumis à une réglementation. La Valeur guide de la qualité de l'air de OMS recommandé pour le toluène est de 280 µg/m<sup>3</sup> durant une semaine d'exposition [29].

L'exposition à l'éthylbenzène pendant 8 heures sous une concentration supérieure à 435 mg/m<sup>3</sup> entraîne une fatigue et une irritation des yeux.

L'OMS recommande de ne pas dépasser la concentration de 22 mg/m<sup>3</sup> durant une année d'exposition et 4,8 mg/m<sup>3</sup> pendant 24 heures d'exposition au xylène [29].

### II.2.3 Transformations chimiques des BTEX dans la troposphère

Les BTEX rejetés dans l'atmosphère participent à des réactions chimiques radicalaires complexes. Parmi celles-ci, on peut noter le dérèglement du cycle de Chapman qui induit une augmentation de la concentration d'ozone dans la troposphère. L'ozone est naturellement présent dans l'air et se forme par combinaison de  $O_2$  et d'un atome d'oxygène provenant de la dissociation du dioxyde d'azote sous l'effet d'un rayonnement ( $h\nu$ ) de longueur d'onde inférieure à 400 nm. Le cycle est fermé par la réaction du monoxyde d'azote sur l'ozone précédemment produit (figure n°06) [30].

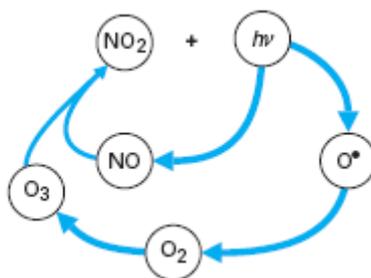


Figure n°06 : Cycle de Chapman

La production d'un fort taux d'ozone résulte d'une modification du cycle due à la présence de COV. En effet, il existe une chaîne complexe de réactions photochimiques et radicalaires qui permet la production de  $NO_2$ , à partir de  $NO$ . Cette dernière réaction est possible si des réactifs radicalaires, oxydants puissants provenant de la dégradation de COV, sont présents. On obtient alors un déséquilibre entre les concentrations d'ozone et d'oxygène présentes dans l'air, comme le montre la modification du cycle de Chapman présentée sur la figure n°07 [15].

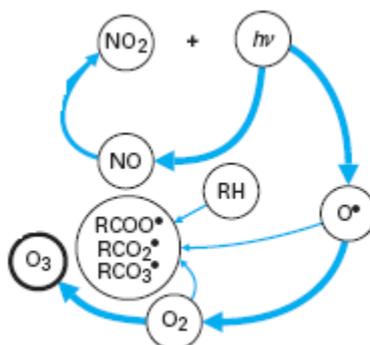


Figure n°07 : Modification du cycle de Chapman

On dit que, ensemble avec les  $NO_x$ , les BTEX sont des précurseurs de l'ozone photochimique.

## II.2.4 Les techniques de prélèvement dans l'air ambiant et d'analyses des BTEX

Plusieurs procédures de prélèvement sont possibles :

- Prélèvement réalisé de façon automatique à l'entrée d'un système analytique (analyseur BTEX, analyseur COV),
- Prélèvement d'air brut dans un canister (enceinte en acier traité intérieurement pour éviter l'adsorption des composés sur la paroi). Cette méthode n'est citée que pour mémoire, car pour le seul prélèvement des BTEX, elle est trop lourde en termes de coût de matériel et d'heures de mise en œuvre.
- Piégeage des composés de l'air à échantillonner sur support solide (cartouche d'adsorbant) : par pompage (**prélèvement actif**) ou par diffusion (**prélèvement passif**)

### a) Prélèvement actif

Il est réalisé par pompage de l'air à échantillonner à travers des cartouches adsorbantes contenant 1, 2 ou 3 lits d'adsorbants. Pour les BTEX l'utilisation d'un seul adsorbant suffit (figure n°08). Pour les BTEX il est recommandé d'utiliser les noirs de carbone graphités à surface spécifique moyenne, de l'ordre de  $100 \text{ m}^2/\text{g}$  : Carbotrap, Carbopack B, Carbopack X, Carbograph 4.... Ces adsorbants présentent l'avantage d'être peu hydrophiles, ce qui permet de prélever des volumes d'air importants, même en présence de fortes humidités relatives, sans piéger de quantités notables d'eau.. Les débits recommandés pour les tubes cités ci-dessus sont compris entre 10 et 200 ml/min. la durée de prélèvement est de quelques heures.

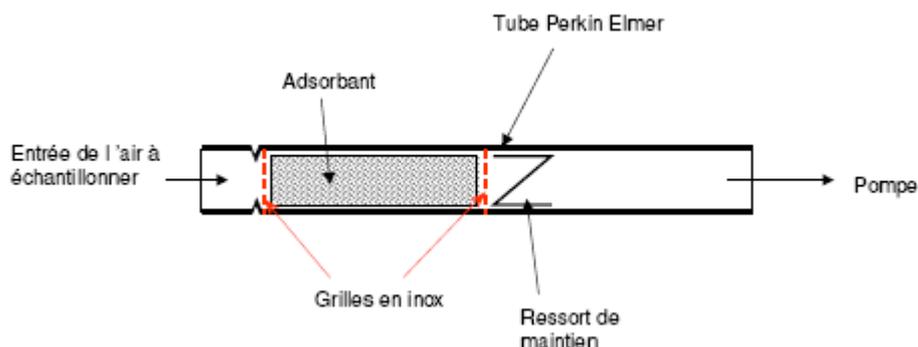


Figure n°08 : Principe du tube actif

## b) Prélèvement passif

Il est réalisé à l'aide de tubes à diffusion. Le prélèvement est ainsi réalisé sur des périodes longues et intègre les variations de concentrations. La durée d'exposition ainsi que la température ambiante sont prises en considération pour la détermination des concentrations en COV. Il existe deux types de tubes principaux : les tubes axiaux, qui ressemblent beaucoup aux tubes actifs à une zone d'adsorbant, et les tubes radiaux.

**Les tubes axiaux** sont principalement de type Perkin Elmer, ils sont munis d'une tête de diffusion qui a pour effet de couper l'effet de vent (Figure n°09).

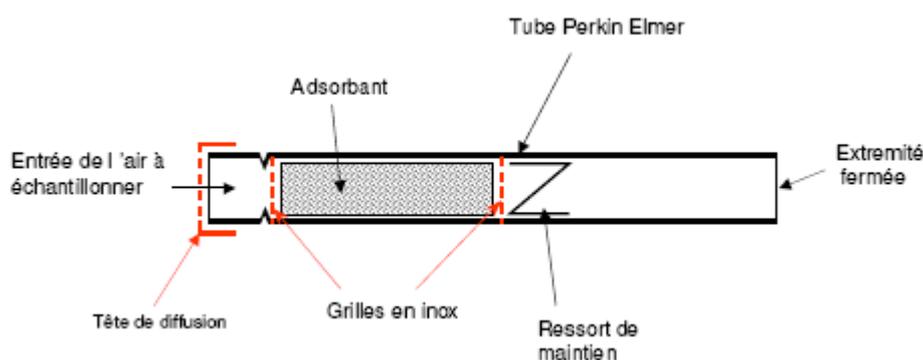


Figure n°09 : Principe du tube passif axial

**Les tubes radiaux** sont du type « Radiello ® » et sont commercialisés par la Fondazione Salvatore Maugeri 12. La cartouche contenant l'adsorbant est introduite dans un corps poreux cylindrique : l'adsorption se fait sur toute la surface du cylindre et pas seulement sur l'extrémité (Figure n°10). Ce type de tube est également bien adapté à des concentrations faibles (inférieures à  $2 \text{ mg/m}^3$ ), pour lesquelles les tubes axiaux présentent une incertitude de mesure importante.

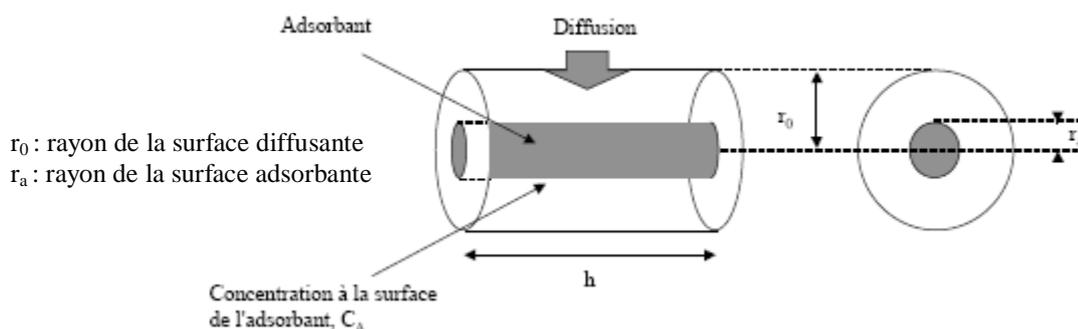


Figure n°10 : Principe du tube passif radial

## II.2.5 Analyse des échantillons

L'échantillon subit après prélèvement (active ou passive), une désorption soit thermique (thermodésorption) ou chimique par l'utilisation du solvant CS<sub>2</sub>.

La séparation des BTEX est réalisée par leurs passages sur une colonne d'un chromatographe en phase gazeuse, généralement capillaire apolaire.

La détection est réalisée soit par un détecteur à ionisation de flamme (FID), soit par spectromètre de masse (MS). Le FID a l'avantage d'être stable dans le temps et linéaire sur une grande gamme de concentrations, l'identification des produits se faisant par le temps de rétention sur la colonne.

## III. ANALYSE GEOSTATISTIQUE

Les méthodes classiques d'interpolations présentent deux inconvénients majeurs. Le premier est le caractère arbitraire de la pondération effectuée, le second est que les caractéristiques intrinsèques du phénomène interpolé n'entrent pas en ligne de compte. Que la diffusion dans l'espace de la pollution soit très régulière ou plus chaotique, la pondération sera la même, puisque ne dépendant que de la configuration géométrique des données. A ces deux inconvénients se rajoute le fait que l'on ne sait pas qualifier la confiance que l'on peut accorder à la carte obtenue, alors que l'on sait qu'il existe une erreur d'estimation. Le modèle probabiliste proposé par la géostatistique remédie à ces faiblesses de mesure où la façon d'interpoler va dépendre de la structure de variabilité du polluant dans l'espace [34].

La géostatistique est une application des méthodes d'analyse probabiliste à l'étude de phénomènes corrélés dans l'espace appelés phénomènes régionalisés. A ce titre, elle fournit différents outils pour répondre au problème posé par la cartographie de la qualité de l'air. Elle fait sa première apparition en 1962 en Afrique de Sud [35].

On suppose que le phénomène régionalisé peut être décrit par la donnée d'une fonction numérique  $Z$  définie dans un domaine circonscrit de l'espace (le champ) et désignée sous le terme de variable régionalisée. Cette fonction n'est connue que partiellement, par l'intermédiaire d'un échantillonnage. Pour la qualité de l'air, cette variable est la concentration d'un polluant.

A partir des mesures disponibles et d'une information relative à la position géographique de ces données, les techniques de la géostatistique permettent de représenter la structure spatiale du phénomène considéré et d'estimer la répartition de la variable régionalisée dans la zone d'étude. Elles permettent en outre, du fait de leur caractère probabiliste, de prendre en compte la part d'aléatoire propre à l'évaluation de la qualité de l'air.

Elles introduisent la notion de fonction aléatoire afin de traduire d'une part l'aspect erratique de la variable régionalisée étudiée, qui empêche de prédire avec certitude les valeurs prises en différents points, et d'autre part, l'existence d'une certaine structure spatiale.

La géostatistique consiste donc à étudier les phénomènes corrélés dans l'espace, au moyen d'un outil probabiliste : “ la théorie de variables régionalisées ”.

Le but initial de la géostatistique est donc d'estimer (prédire, évaluer) la répartition de ces variables régionalisées dans un espace connu.

On cherche alors à prévoir une quantité qui dépend, bien évidemment, de la variable en dehors des points de données.

Or les variables régionalisées étudiées en géostatistique présentent très souvent un comportement irrégulier, aléatoire, rendant la prévision incertaine.

C'est en étudiant ce comportement, en dégagant la structure, puis en faisant usage de celle-ci, que la géostatistique parvient à une meilleure connaissance de son phénomène.

La géostatique présente deux phases :

- La première est l'analyse spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme (variographie)
- La seconde emploie une technique de prédiction spatiale utilisant comme outil le krigeage

Le variogramme expérimental est l'outil qui nous permet d'analyser la structure spatiale du polluant et confirmer ou non la stationnarité de la variable. De même on montre l'équivalence entre le variogramme et la covariance  $C(h)$ .

La caractérisation des structures de la variabilité spatiale ou l'analyse structurale est la première étape indispensable pour toute étude géostatistique [36, 37].

### III.1. Analyse de la structure spatiale (variographie)

Dans la caractérisation des structures de la variabilité spatiale ou l'analyse structurale, on étudie, en général, le corrélogramme, graphe d'autocorrélation  $\rho(h)$  ou le variogramme, graphe de la fonction  $\gamma(h)$  qui permettent de résumer et de quantifier toute l'information structurale sur le phénomène étudié [36].

Il est préférable de calculer le variogramme que le corrélogramme vu que ce dernier suppose l'existence d'une variance finie, qui n'est pas toujours le cas [38].

#### III.1.1 Rappel statistique de base

##### a) Notion de variable régionalisée

Beaucoup de phénomènes peuvent être représentés par des répartitions spatiales ou régionalisation de la variable caractéristique appelée variable régionalisée (VR) [39].

La variable régionalisée présente deux aspects contradictoires [40] :

- Un aspect aléatoire : la variable étudiée présente des irrégularités dans l'espace, imprévisibles d'un point à l'autre.
- Un aspect structuré : ce qui caractérise un phénomène régionalisé qui fait appel à une certaine organisation de la variable dans l'espace.

##### b) Hypothèse stationnaire d'ordre II

Une fonction aléatoire est dite stationnaire d'ordre II si [41] :

- L'espérance mathématique existe et elle est constante

$$E(Z(x)) = m, \forall x \dots\dots\dots(1)$$

- La covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'interdistance (h)

$$Cov(h) = E(Z(x), Z(x+h)) - m^2, \forall x \dots\dots\dots(2)$$

L'existence de la stationnarité de la covariance et du variogramme implique alors l'existence de la stationnarité de la variance et du variogramme.

##### c) Hypothèse intrinsèque

Une fonction  $Z(x)$  est dite intrinsèque si :

- L'espérance mathématique existe et ne dépend pas du point d'implantation  $x$

$$E(Z(x)) = m, \forall x \dots\dots\dots(3)$$

- Pour tout vecteur  $h$ , l'accroissement  $[Z(x+h) - Z(x)]$  a une variance finie qui ne dépend pas de  $x$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (4)$$

Cependant, dans le cas du corrélogramme, l'hypothèse stationnarité d'ordre II est supposée vérifiée (variance finie), alors que dans le cas du variogramme, les accroissements  $Z(x+h) - Z(x)$  seulement sont stationnaires d'ordre II. Cette hypothèse est appelée hypothèse intrinsèque [38].

### III.1.2. Le variogramme

#### a) Notion de variogramme

L'idée fondamentale revient au fait que la nature n'est pas entièrement "imprévisible". Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées.

Exemple : Soit trois localisations  $x_0$ ,  $x_1$  et  $x_2$ . On mesure la teneur de polluant en chacun de ces points.

$$x_1 \quad x_0 \quad x_2$$

La teneur au point  $x_1$  devrait ressembler plus (en moyenne) à celle observée en  $x_0$  qu'à celle en  $x_2$ . On a peut-être intérêt à utiliser l'information contenue en  $x_1$  et  $x_2$  pour fournir un meilleur estimé de  $x_0$  que si l'on n'utilisait que  $x_1$ . Il existe donc une continuité spatiale du phénomène naturel étudié que la variographie cherche à quantifier.

Considérons une propriété notée  $Z$  connue en «  $n$  » points de l'espace géographique, chacun de ces points étant repéré par le vecteur  $x$  de ses coordonnées géographiques (longitude, latitude).

De la sorte, la notation " $Z(x_i)$ " représente la valeur observée de la propriété  $Z$  au  $i$ ème point d'échantillonnage de la coordonnée  $x_i$ . Prenons deux valeurs " $Z(x)$ " et " $Z(x+h)$ " de la propriété  $Z$  distant du vecteur " $h$ ". On cherche à comparer ces deux valeurs ; une façon simple est d'utiliser la variance entre les observations de ces deux sites, notée  $S^2$ , elle est par définition égale à :

$$S^2 = [Z(x) - \bar{Z}]^2 + [Z(x+h) - \bar{Z}]^2 \quad (5)$$

$\bar{Z}$  est la moyenne entre les deux observations

La variance ( $S^2$ ) traduit l'importance des écarts à la moyenne, elle est d'autant plus grande que les observations sont différentes. Si on développe l'équation (5) on peut obtenir une autre expression de  $S^2$

$$S^2 = \frac{1}{2} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (6)$$

Si on considère maintenant "n" couples distants de la même distance "h", la moyenne de ces "n" variances s'écrit

$$S^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (7)$$

Pour une distance "h" séparant deux points d'observation,  $S^2$  rend compte de la ressemblance des observations faites en ces deux points : il sera d'autant plus grand que ces observations sont différentes. La variance ( $S^2$ ) est qualifiée de "semi-variance" [39].

### b) Intérêt du variogramme

L'intérêt de cette notion simple et les conditions de sa généralisation ont été définis par la théorie des variables régionalisées [42]. Cette théorie montre que la généralisation de l'équation (7) suppose deux conditions, regroupées sous le terme d'hypothèse intrinsèque telle quelle a été définie plus haut :

- l'espérance de  $Z$  est constante quelle que soit la position géographique "x" :
- pour toute distance "h", la différence  $[Z(x) - Z(x+h)]$  a une variance finie, qui ne dépend que de la distance h séparant les points.

Quand ces deux conditions sont vérifiées, la valeur  $S^2$  définie dans l'équation (7) constitue un estimateur non biaisé de la fonction  $\gamma(h)$  définie par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (8)$$

Où :

- x est le vecteur de coordonnées (1, 2 ou 3 coordonnées selon le cas);
- h est le vecteur distance.

Cette fonction  $\gamma(h)$  est nommée variogramme

En étudiant l'évolution du variogramme  $\gamma(h)$  en fonction de la distance "h" séparant des couples d'observation (figure n°11), on peut analyser la façon dont se détériore l'information acquise en un point au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point [39,43].

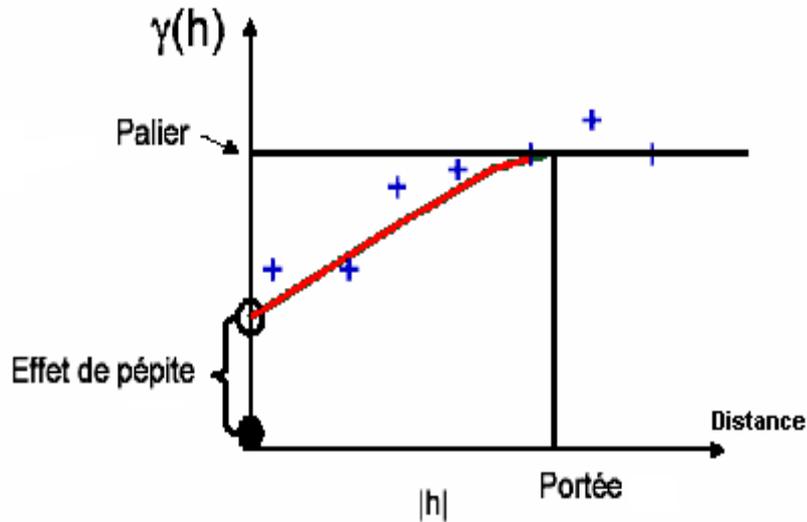


Figure n°11: modèle d'un variogramme

### c) Définitions

Un certain nombre de termes est utilisé pour décrire un variogramme (figure n°11).

**i- L'effet de pépité :** il s'agit de la valeur de la semi-variance pour une distance nulle.

En théorie, on devrait avoir un  $\gamma(h) > 0$  pour un  $h > 0$ , mais fréquemment, le variogramme présente une ordonnée à l'origine non nulle (figure n°11). Cet écart est qualifié "effet de pépité".

Il est interprété comme étant le résultat d'erreurs de mesure ou d'une variabilité spatiale présente à une distance inférieure au pas d'échantillonnage.

**ii- Le palier :** valeur de la semi-variance à partir de laquelle le variogramme ne croît plus.

**iii- La portée:** distance à partir de laquelle le palier est atteint. C'est la distance à partir de laquelle les valeurs de la variable entre deux points sont indépendantes (non corrélées) [39,43].

### d) Formes du variogramme

L'analyse du variogramme cherche une fonction caractéristique de la structure de la variable étudiée.

En premier lieu, on étudie quelques caractéristiques du variogramme :

## - Comportement au voisinage de l'origine

La continuité et la régularité dans l'espace de la fonction aléatoire et donc la variable régionalisée qu'elle présente sont liées au comportement à l'origine du variogramme [40].

On distingue 04 types [44]:

1- Allure parabolique : comportement dérivable à l'origine, ceci est la caractéristique d'une variabilité spatiale hautement régulière (figure n°12 a)

2- Allure linéaire :  $\gamma(h)$  reste continue à l'origine mais n'est plus dérivable, donc moins régulière (figure n°12 b).

3- Discontinuité à l'origine :  $\gamma(h)$  ne tend pas vers (0) lorsque  $h$  tend vers (0), cette discontinuité en  $h = 0$  du variogramme est appelée effet de pépite (figure n°12 c) qui est dû : soit à la présence d'une structure dont l'échelle est très inférieure à l'espacement des données et on parle de micro-régionalisation des données [38, 43], soit à la présence d'erreurs de mesures [43, 45], soit au nombre insuffisant de couples de mesures à faible distance induisant éventuellement une incertitude sur la détermination de l'effet de pépite.

4- Effet de pépite pur (aléatoire pur) : c'est le cas limite du cas précédent quand  $\gamma(h)$  ne traduit plus que la seule discontinuité à l'origine (figure n°12d)

$$\gamma(h) = 0 \text{ est } (h) = C_0 \text{ dès que } h > 0$$

Cela indique que  $Z(x)$  et  $Z(x+h)$  sont sans corrélation quelle que soit leur distance ( $h$ ) non nulle [44], ce type de modèle s'explique généralement par l'absence d'une structure spatiale, plus fréquemment, par l'existence d'une structure marquée par des erreurs expérimentales ou inférieures au plus petit intervalle d'observation [43, 45].

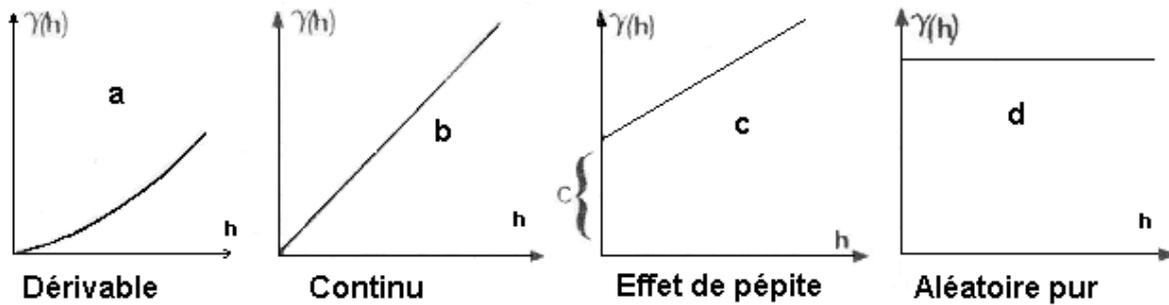


Figure n°12 : Comportement à l'origine des différents variogrammes

### - Comportement du graphe à l'infini

Il pourra être borné ou non borné autour d'une valeur du palier, égale à la variance sur l'ensemble des données.

Dans ce cas, la stationnarité d'ordre II de la variance est vérifiée. Cette longueur est interprétée comme la distance maximale pour laquelle un point présentera une influence sur son entourage [45]. Cette valeur donne la distance au-delà de laquelle elles sont indépendantes (fig.13a, 13b et 13c).

Dans le variogramme non borné (fig.13d), la stationnarité d'ordre II n'est pas vérifiée et le variogramme continu à croître sans atteindre un palier. Trois interprétations peuvent être attribuées[45]:

- Le palier n'a pas atteint la portée à l'échelle de notre travail
- La variance infinie représentative d'une variable régionalisée respectant l'hypothèse intrinsèque
- La présence d'une dérive pourrait être aussi une explication à ce type de variogramme.

### e) Autres types de variogrammes :

Il existe bien d'autres variogrammes hors de ceux déjà cités. Ces variogrammes peuvent présenter certaines hypothèses tels que les variogrammes à périodicité ou à structure gigogne (superposition de variation d'échelles différentes) ainsi que ceux à effet de trou (existence de corrélation négative due à la présence de zones riches entourées de zones pauvres) [43].

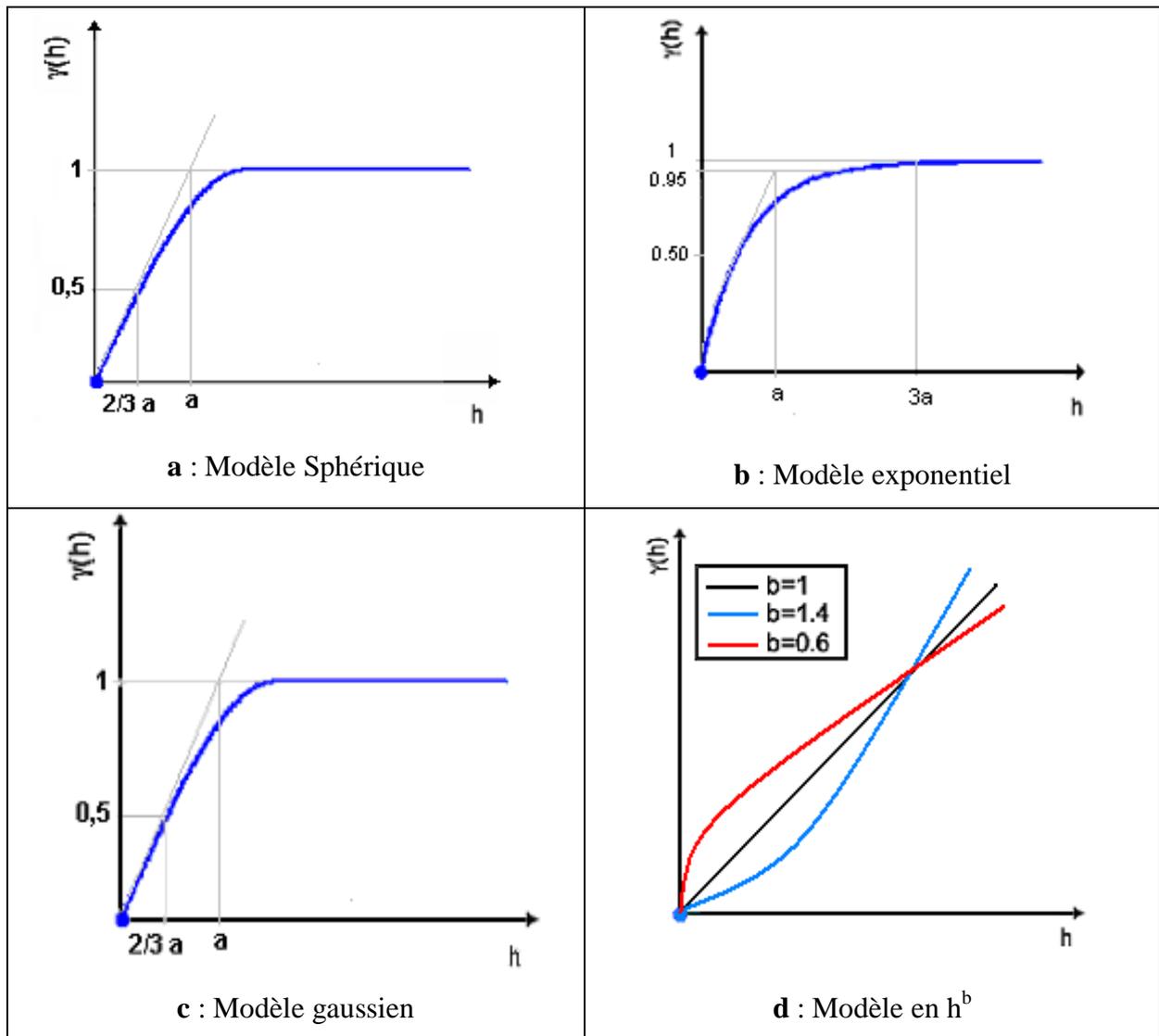


Figure n°13 : Principaux modèles de variogrammes utilisés [45]

### f) Ajustement d'un variogramme

Pour tenir compte des caractéristiques du variogramme dans la démarche géostatistique, il est indispensable d'ajuster une fonction au variogramme expérimental, ce qui permet d'en résumer les principales caractéristiques. Ces fonctions doivent présenter deux qualités [36]:

- Rendre compte le mieux possible de l'information du variogramme expérimental.
- Satisfaire les conditions théoriques : elles doivent être "semi-positives"

L'ajustement se fait par l'emploi d'un certain nombre de modèles autorisant essentiellement deux types [36, 44, 45]:

### A- Modèles croissants non bornés (figure 14):

#### Modèle linéaire

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + b\mathbf{h} \quad (9)$$

Avec  $C_0$  : L'ordre à l'origine  
 $b$  : la pente de la droite  
 $h$  : distance séparant les points

#### cas particulier du linéaire

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 \quad (10)$$

C'est le cas d'un variogramme plat appelé pépitique

#### Fonction puissance

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + b\mathbf{h}^\alpha \quad (11)$$

$$0 < \alpha < 2$$

Avec :  $b$  : la pente de la droite  
 $\alpha$  : un coefficient fixant la forme de la courbe

### B- Modèles croissants bornés (figure 15)

#### Modèle sphérique

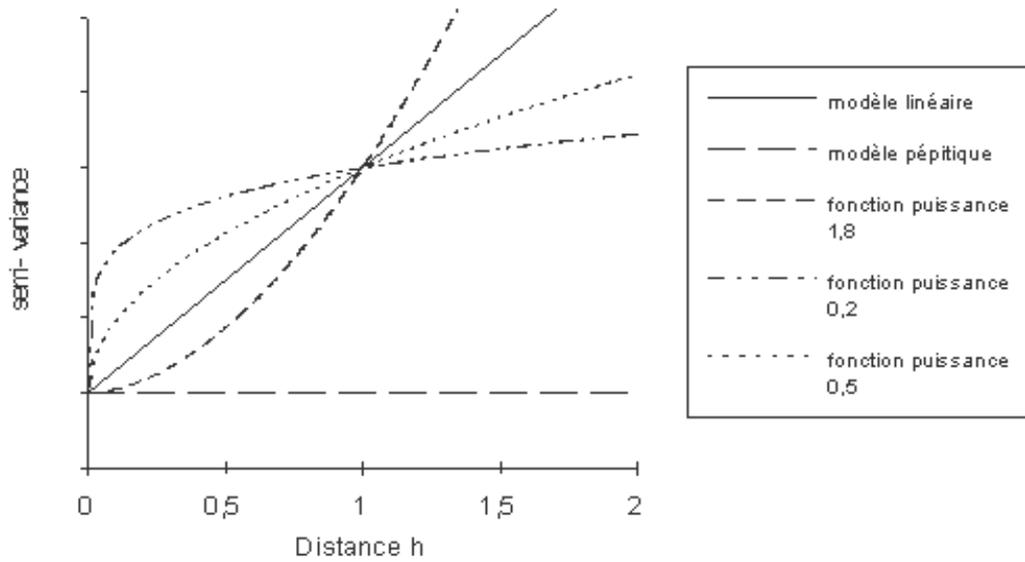
$$\begin{aligned} \gamma(\mathbf{h}) &= C_0 + C[3h/2a - 1/2(h/a)^3] && \text{si } h \leq a \\ \gamma(\mathbf{h}) &= C_0 + C && \text{si } h > a \end{aligned} \quad (12)$$

Avec  $C_0$  : l'ordre à l'origine  
 $C$  : est le palier moins l'ordonnée à l'origine  
 $a$  : la portée

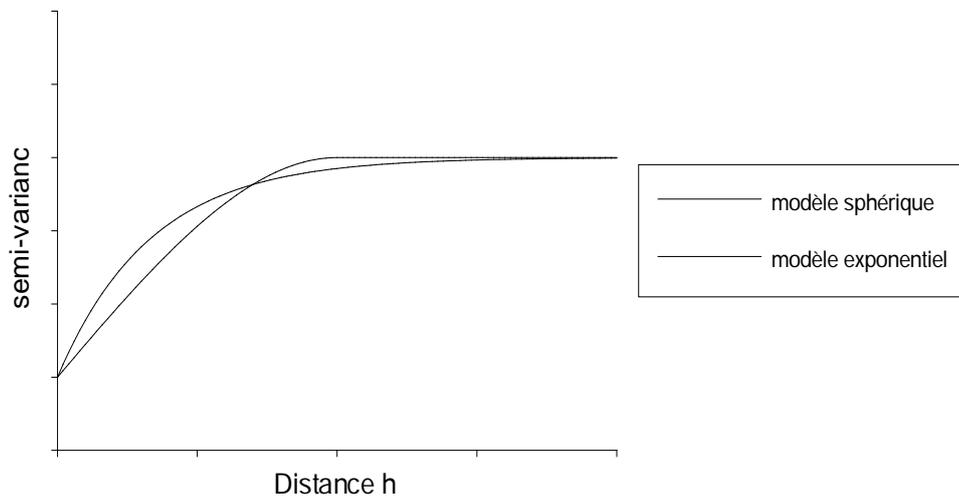
#### Modèle exponentiel

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C[1 - \exp(-h/r)] \quad (13)$$

Avec  $C_0$  : l'ordre à l'origine  
 $r$  : paramètre de la distance égale environ le tiers de la portée



**Figure n°14** : Modèles croissants d'ajustement



**Figure n°15** : Modèles d'ajustement aux variogrammes bornés

### g) Validation du modèle

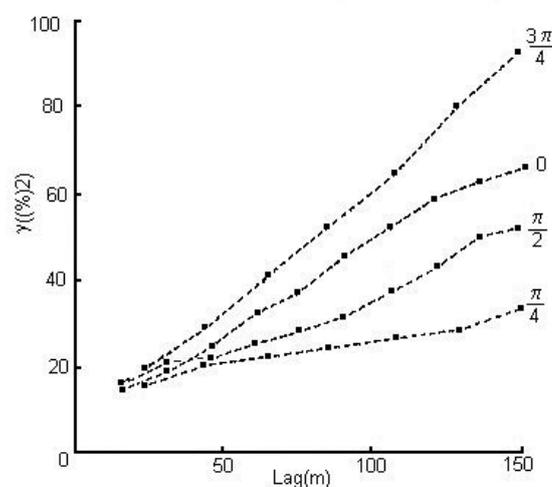
Pour s'assurer du meilleur choix d'ajustement qui satisfait l'utilisation du krigeage (2<sup>ème</sup> étape), on peut procéder de deux manières :

- Soit en retirant la fonction qui donne le meilleur résultat dans un test de validation croisé ; dans ce cas, on supprime un des points, on calcule l'estimation en ce point de mesure. Le travail se fait pour tous les points de mesure. On peut alors vérifier qu'en moyenne les valeurs estimées sont proches des valeurs expérimentales et les comparer à leur variance d'estimation respective [36, 44, 45].
- Soit par la fonction qui s'ajuste le mieux aux points expérimentaux du variogramme [46]. Pour cela, on procède par le calcul des écarts entre les points expérimentaux du variogramme et les fonctions d'ajustement. L'importance de ces écarts peut être quantifiée par leur moyenne quadratique [43, 47].

## h) Anisotropie

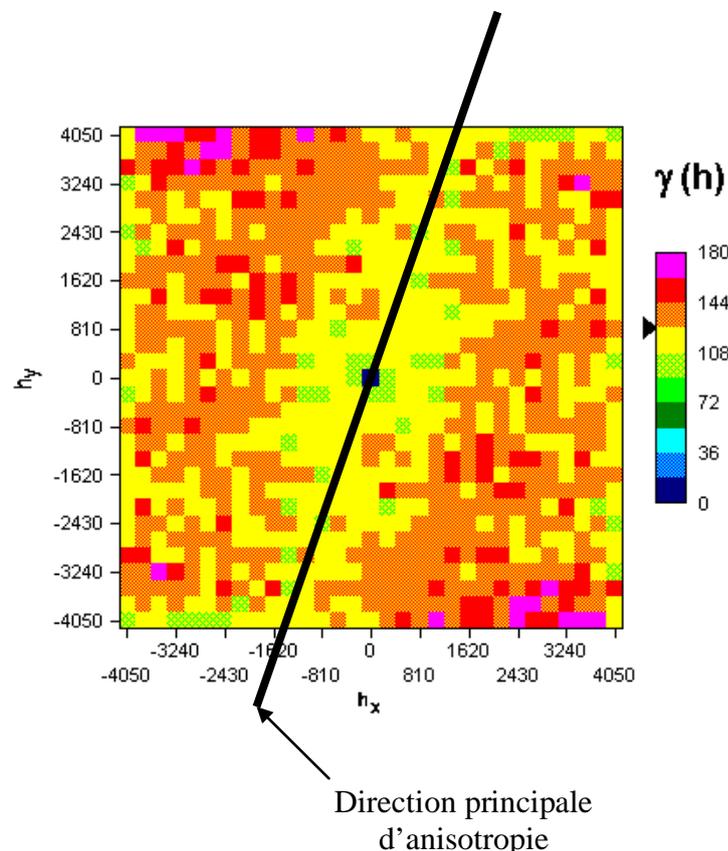
Le phénomène d'anisotropie se présente quand la variabilité spatiale n'est plus la même dans toutes les directions c'est à dire qu'il y a des directions privilégiées vis à vis du phénomène étudié [40]. L'orientation préférentielle de ces directions incite à rechercher une éventuelle anisotropie dans la variabilité spatiale des propriétés intrinsèques d'une zone d'étude (figure n°16).

Le calcul de l'anisotropie nécessite la construction de deux variogrammes directionnels modélisés. Le premier est construit dans la direction principale de l'anisotropie et le second dans la direction perpendiculaire à la première. Le rapport entre les valeurs des deux portées relatives aux deux variogrammes directionnels donne la valeur de l'anisotropie, étape qui permet de passer par la suite, au krigeage et donc à l'interpolation.



**Figure n°16** : Variogrammes directionnels selon les quatre principales directions

Certains logiciels tels que le Variowin permettent de déceler la présence d'une anisotropie et sa principale direction par le biais du variogramme surfacique (figure n°17). Ce logiciel permet également de calculer la valeur de l'anisotropie par ajustement simultané des deux vriogrammes directionnels.



**Figure n°17 :** Variogramme surfacique montrant la présence d'une anisotropie selon une direction principale

### III.2. Le krigeage

Le Krigeage est une technique de prédiction prenant en compte l'information fournie par le variogramme et permettant ainsi une estimation avec précision connue des propriétés de la variable étudiée en des sites non échantillonnés [36]. Son nom est donné par le professeur Matheron, fondateur de la discipline de géostatistique en hommage au docteur Krige pour ces travaux sur les gisements d'or Sud africains.

C'est une méthode probabiliste d'interpolation spatiale, elle est probabiliste dans la mesure où elle considère que le champ spatial de la variable étudiée est une réalisation d'une fonction aléatoire [39].

Il définit un estimateur  $Z^*$  d'une propriété  $Z$  en un point quelconque de l'espace géographique. Cette estimation est faite à partir des observations effectives  $Z(x)$  de la propriété étudiée. Il fournit ensuite un indicateur de la précision de l'estimation faite à travers une variance d'estimation [36, 39, 47].

### III.2.1 Différents type de krigeage

#### a) Le krigeage ordinaire

La forme la plus simple et la plus employée de cette technique est celle du krigeage linéaire. L'estimation de  $Z^*(x_0)$  faite en un point  $x_0$  par le krigeage linéaire est :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (14)$$

Où  $n$  : est le nombre de points expérimentaux pris en compte dans l'estimation

$\lambda_i$  : est le poids affecté au point expérimental  $x_i$

Pour résoudre le système d'équations induit par la recherche des poids  $\lambda_i$ , il faut introduire des conditions d'optimisation [36, 39, 47]. Ces conditions sont :

- *Non biaisée* : c'est un choix selon lequel l'erreur moyenne doit être nulle

$$E[Z^*(x) - Z_0(x)] = 0 \quad (15)$$

- *Variance d'estimation minimale*

$$\text{Var} [Z^*(x) - Z_0(x)] \text{ minimale} \quad (16)$$

On précise que le calcul du poids affecté à un point observé ne dépend pas de la valeur de la variable étudiée en ce point. Il dépend uniquement [36]:

- De la structure spatiale de la variable relevée par le variogramme.
- De la distance géographique du point observé au point estimé.

#### b) Le krigeage en bloc :

Il est considéré comme une simple extension du krigeage ordinaire. Au lieu de faire une estimation en un point, l'estimation porte sur la valeur moyenne d'une propriété sur une surface. Cette technique est utilisée pour obtenir des cartes plus lissées ou pour estimer des stocks [36].

### c) Le krigeage disjonctif

L'estimation d'un point à estimer se fait par une fonction plus générale qu'une simple combinaison linéaire des valeurs aux points observés. Cette technique permet de tracer des cartes de probabilité qui ne dépassent un seuil donné, elle est souvent utilisée pour cartographier un polluant [36, 39].

### d) Le co-krigeage

Dans cette technique de krigeage, on exploite la corrélation entre deux variables. En effet, lorsque une corrélation existe entre deux variables, le co-krigeage est employé, chose qui peut être difficile (par exemple mesure physique au laboratoire) ou facile (observation sur terrain). Le co-krigeage permet de cartographier une variable peu échantillonnée en utilisant les observations plus nombreuses d'une variable facile d'accès [36, 37, 41].

### e) Le krigeage d'indicatrices

Il permet de traiter des variables nominales ou qualitatives ordonnées. C'est une approche non paramétrique reposant sur une transformation préalable de la variable étudiée en indicatrice prenant la valeur 0 et 1 selon des seuils choisis de la variable [36, 37].

L'idée de base repose sur le fait que l'analyse spatiale par ce type de krigeage se fait non pas sur la variable elle-même mais sur la transformée de cette variable par codage binaire dite fonction indicatrice [36, 37, 41].

Soit  $Z$  la variable étudiée avec des réalisations  $Z(x_i)$  en des points de coordonnées  $x_i$ , si on considère un seuil donné «  $c$  » de cette variable, on peut définir une fonction binaire "I" appelée fonction indicatrice  $[I(x_i, c)]$  prenant la valeur 0 ou 1 pour tout point échantillonné  $Z(x_i)$  [38]. telle que :

$$\begin{aligned} I(x_i, c) &= 1 && \text{si } Z(x_i) \leq c \\ I(x_i, c) &= 0 && \text{si } Z(x_i) > c \end{aligned}$$

Cette approche est dans le cas où on étudie une variable qui présente une variabilité spatiale régionale et locale importante, une loi de distribution qui n'est pas normale et un nombre important de valeurs extrêmes [37]. Ces valeurs extrêmes qui ont tendance à être éliminées par krigeage ordinaire [36].

### III.3. La cartographie

La cartographie est l'aboutissement final de la géostatistique. Ainsi, après avoir estimé la valeur d'une propriété en tout point d'un domaine, l'obtention d'une carte est aisée.

En général, on procède à l'estimation de la propriété étudiée aux nœuds d'une fine grille carrée couvrant le domaine d'étude. Les résultats obtenus sont alors visualisés :

- Soit en traçant des courbes d'isovaleurs entre les points de la grille
- Soit en construisant un bloc-diagramme
- Soit en construisant une carte maillée en niveaux gris ou en couleur.

En plus de la carte d'estimation de la propriété, on peut représenter la carte de la variance d'estimation pour visualiser les secteurs où les estimations sont précises de ceux où elles le sont moins [37,41, 43].

## IV. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

### IV.1. Les tubes à diffusion « Radiello<sup>®</sup> »

L'échantillonnage par diffusion passive est la méthode retenue pour cette étude qui, contrairement aux stations fixes et les laboratoires mobiles, permet de réaliser des mesures sur des zones vastes et de déterminer, avec un coût acceptable, la distribution spatiale des polluants sur la zone d'étude.

L'échantillonneur diffusif a l'avantage de ne pas utiliser de pompes lourdes et encombrantes, n'a pas de limites dues aux besoins énergétiques, ne demande pas de surveillance, ne fait pas de bruit et ne craint pas les milieux inflammables ou explosifs.

Les capteurs passifs destinés à la mesure des BTEX sont des capteurs « Radiello<sup>®</sup> », fournis par la fondation Salvatore MAUGERI [48].

L'efficacité de ces capteurs a été démontrée par plusieurs études [49, 50, 51].

Les tubes « Radiello » sont constitués par deux tubes cylindriques concentriques :

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

La cartouche Radiello code 130 destinée à l'adsorption des BTEX et COV est un tube filet d'acier inoxydable de 5,8 mm de diamètre à la maille 100 mesh, rempli avec 530±30mg de charbon actif 35-50 mesh.

Les étapes de l'utilisation d'un tube Radiello sont les suivantes :

- 1- La cartouche est introduite dans le corps diffusif
- 2- Le corps diffusif est vissé à la plaque du support
- 3- Une étiquette est fixée sur la poche du support pour l'inscription de différentes informations (Numéro du site, Date du début d'échantillonnage)
- 4 Les supports sont placés dans une boîte de protection. Après fixation du boîtier sur site, l'échantillonnage peut commencer.
- 5,6- L'échantillonnage terminé, la cartouche est récupérée et mise dans un tube puis acheminée vers le laboratoire pour analyse (photos 1 à 6).



1



2



3



4



5



6

On calcule la valeur moyenne de la concentration  $C$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durant la période d'exposition par l'équation suivante [48] :

$$C [\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] = \frac{m [\mu\text{g}]}{Q_k [\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}] \cdot t [\text{min}]} \cdot 1.000.000$$

Où :

$m$  : masse collectée en  $\mu\text{g}$

$t$  : temps d'exposition en minutes

$Q_k$  : débit de piégeage

Le débit de piégeage à  $25^\circ\text{C}$  et  $1\,013\text{ hPa}$  est donné par le fabricant des tubes Radiello ;

Il est de [48] :

Benzène : 80 ml/min

Toluène : 74 ml/min

Ethylbenzène : 68 ml/min

m-Xylène : 70 ml/min

p-Xylène : 70 ml/min

o-Xylène : 65 ml/min

Le changement du débit de piégeage avec la température en Kelvin (K) par rapport à la valeur mesurée à 298 K est donné par :

$$Q_K = Q_{298} \left( \frac{K}{298} \right)^{1,5}$$

où  $Q_K$  est la valeur du débit à la température K alors que  $Q_{298}$  est celui donné à la température de référence de 298 K. Le débit de piégeage ne change pas avec l'humidité dans l'intervalle 15-90% et avec la vitesse de l'air dans l'intervalle 0,1 et 10 m·s<sup>-1</sup>.

## IV.2. Analyse des échantillons

Les composés organiques volatiles piégés par adsorption, sont désorbés par le disulfure de carbone et sont analysés par la chromatographie gazeuse capillaire détecteur FID.

### IV.2.1. Désorption

Des pipettes ou des doseurs volumétriques étalonnés en classe A sont utilisés. Sans enlever la cartouche de son tube verre, on y introduit 2 ml de CS<sub>2</sub> (CS<sub>2</sub> de marque Fluka). Après agitation durant une trentaine de minutes, l'échantillon désorbé est prêt à l'analyse.

### IV.2.2. Conditions opératoires

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

Après plusieurs essais d'optimisation sur des solutions étalons des différents BTEX (marque Supelco), nous avons retenu les conditions opératoires suivantes :

- Type de la colonne : Colonne capillaire Supelco BP5 de diamètre 0,53 mm et de longueur 15 m
- Volume d'injection : 1 µl
- Mode d'injection : Split avec un rapport de split de 100/1
- Le gaz d'élution : le N<sub>2</sub> à 30 ml/min
- Température de l'injecteur : 250 °C
- Température de four : 80 °C

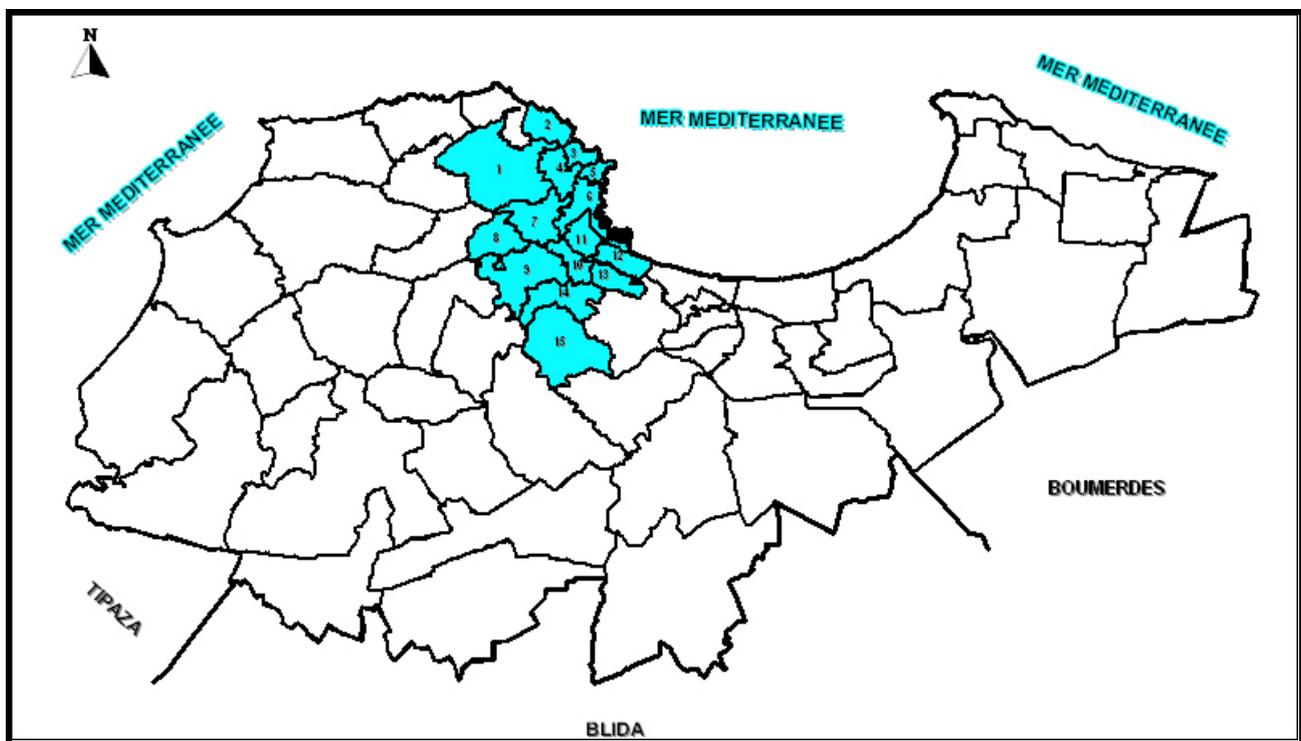
L'étude quantitative a été effectuée à partir des courbes d'étalonnage des substances standard pures. (L'ensemble des courbes d'étalonnage sont donnés en Annexe n°01)

### IV.3. Zone d'étude

Les deux campagnes de mesures effectuées sur la zone d'Alger Ouest s'inscrivent dans le cadre d'un plan couvrant le suivi de la qualité d'air au niveau de l'agglomération d'Alger. Quinze communes ont été retenues pour l'étude.

#### IV.3.1. Description de la zone d'étude [52]

La zone d'étude est située au Nord de l'Algérie à 36° 45' de longitude et 3° 02' de latitude. Elle s'étend sur une superficie de 56,16 km<sup>2</sup> et couvre une population d'environ 877 000 habitants. Elle constitue environ 30% de la population totale de la wilaya et 20% de sa superficie. Nous illustrons en figure n°18 les communes étudiées sur la carte d'Alger.



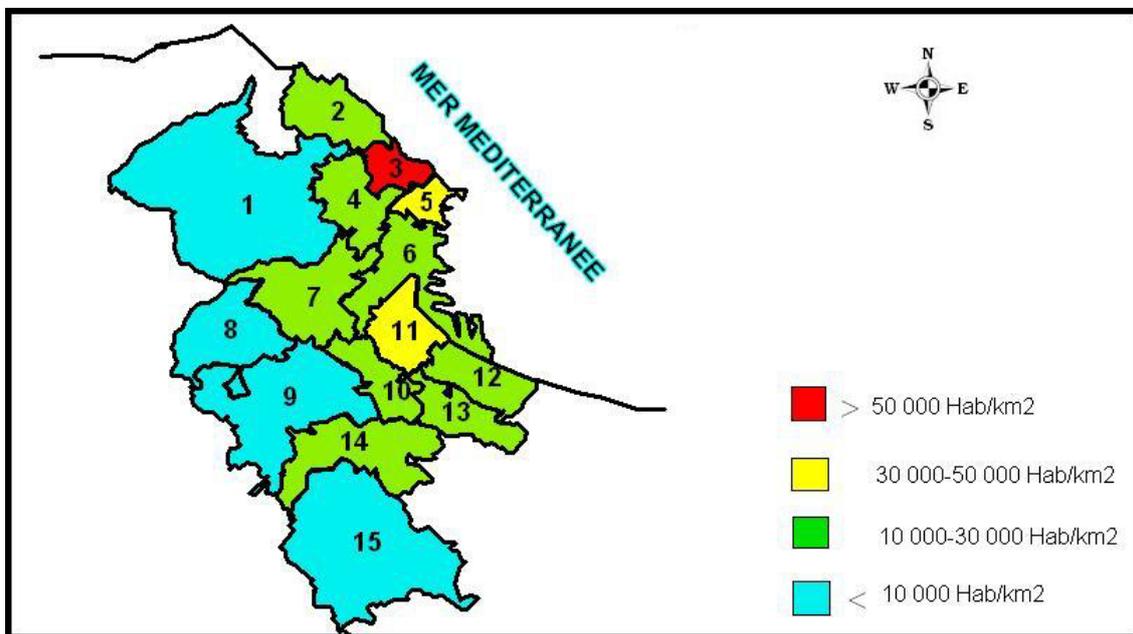
**Figure n°18:** Localisation des communes de la zone d'étude  
(Les numéros des communes sont donnés en tableau n°02)

Le tableau n°02 nous donne la répartition de la population et la densité de population par commune (figure 19).

**Tableau n°02 : Répartition de la population et de la superficie par commune**

(Source : DPAT Alger 2005)

N°	Commune	Population Au 01/01/2004	Superficie (km <sup>2</sup> )	Densité de la population (Hab/km <sup>2</sup> )
1	Bouzareah	73 293	12,44	5 891
2	Bologhine	45 439	2,76	16 463
3	Bab El Oued	91 223	1,21	75 390
4	Oued Koriche	55 924	2,24	24 966
5	Casbah	52 582	1,08	48 687
6	Alger Centre	100 741	3,7	27 227
7	El Biar	55 032	4,08	13 488
8	Ben Aknoun	20 566	3,83	5 369
9	Hydra	37 592	6,12	6 142
10	El Mouradia	30 961	1,91	16 209
11	Sidi M'Hamed	94 136	2,18	43 181
12	Belouizdad	61 962	2,16	28 686
13	El Madania	52 778	2,17	24 321
14	Bir Mourad Rais	45 741	4,15	11 021
15	Birkhadem	59 118	8,89	6 649



**Figure n°19: Carte de densité de population**

Ces communes sont caractérisées par une forte urbanisation et une longueur total de route d'environ 155 km soit une densité de route d'environ 3km/km<sup>2</sup>.

La zone d'étude constitue le cœur d'Alger où se concentre la plupart des activités commerciales et administratives de la Wilaya. Elle connaît aussi un trafic routier important le long de la semaine.

## a) Le climat

De type méditerranéen modéré, le climat d'Alger est d'amplitude thermique faible avec un peu de gelée. D'octobre - novembre à mars - avril, les masses d'air arctique l'emportent généralement et déterminent une saison froide et humide. Les autres mois de l'année, les masses d'air tropical remontent et créent chaleur et sécheresse. Le temps variable, fréquent sur la Wilaya, est créé par des fronts discontinus, dus à la circulation zonale (d'Ouest en Est) de l'air.

L'humidité est due dans la Wilaya à des dépressions de front polaire qui balayent les montagnes et provoquent pluie et neige.

### Température

La température moyenne annuelle se situe autour de 18 C° avec un maximum de 33C° en été et un minimum de 5C° en hiver. Ainsi les gelées sont exceptionnelles.

La figure n°20 nous donne les valeurs moyennes mensuelles des températures sur la période 1993-2002.

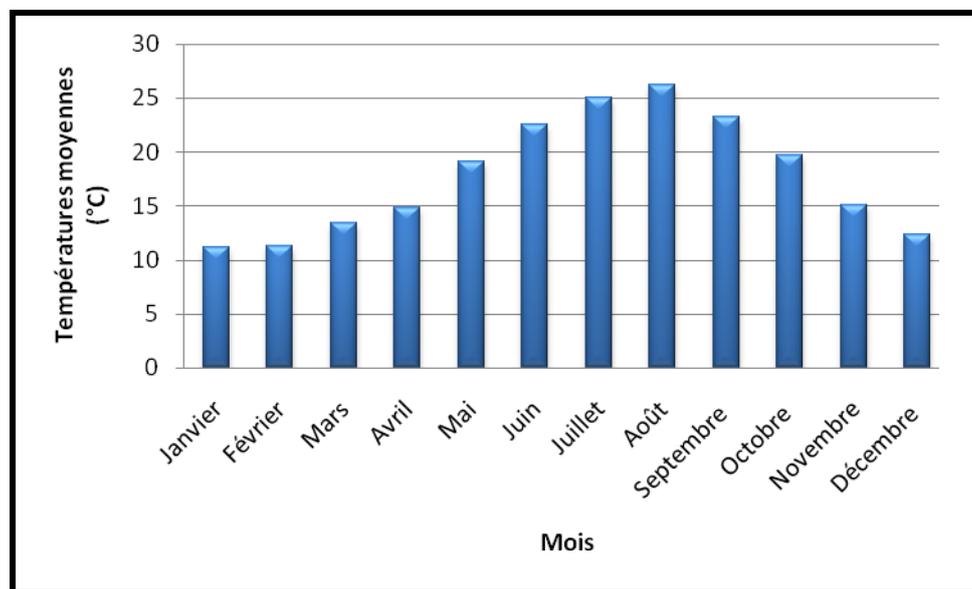


Figure n°20 : Températures moyennes d'Alger (moyenne sur 10 ans source ONM)

### Pluviométrie

Le climat d'Alger est de type méditerranéen. La pluviométrie moyenne est d'environ 600 mm/an.

Cette quantité d'eau mal répartie durant l'année nous permet de distinguer deux périodes :

- une période humide allant d'octobre à avril avec des pluies particulièrement importantes (environ 522 mm)

- une période sèche de Mai à septembre, influant négativement sur la disponibilité en eau.

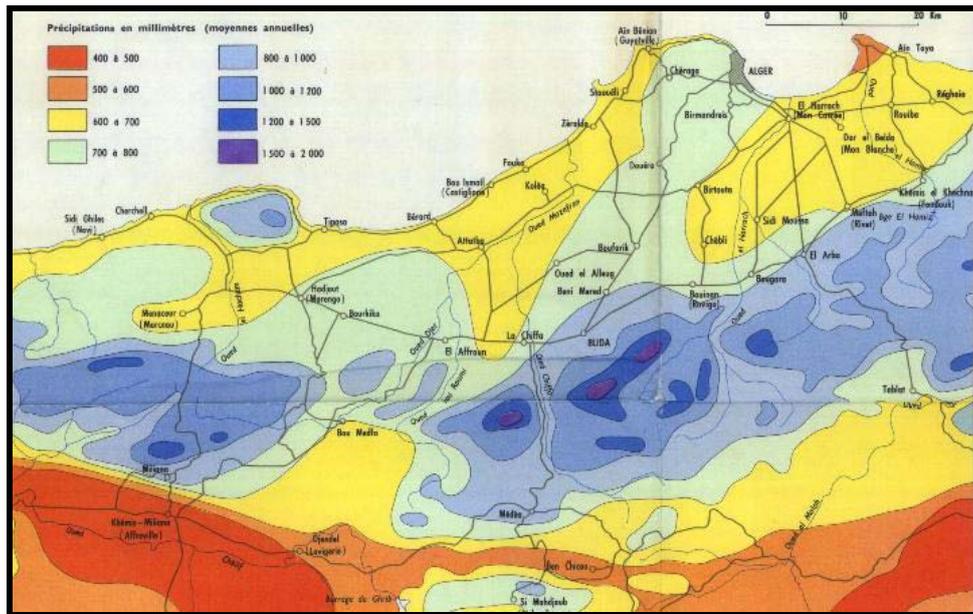


Figure n°21 : Précipitation annuelle de la zone côtière Alger et environs [53]

## Vents

L'été montre la prédominance des vents de direction Nord (N, NE), pour l'automne, l'hiver et le printemps, elle est en faveur des vents du sud et du Sud-ouest (figure n°22). La zone d'étude est ainsi fréquemment balayée par les vents Nord et Nord-est.

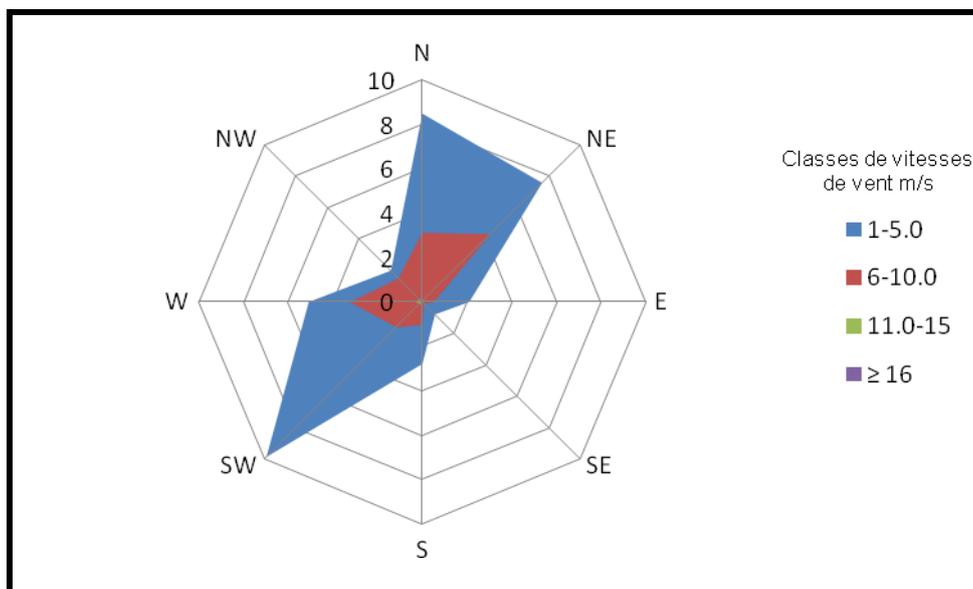


Figure n°22: Rose des vents annuelle d'Alger (moyenne sur 10 ans source ONM)

## b) Le réseau routier

La longueur de réseau routier de la wilaya est de 705 km dont 155 km qui traverse la zone d'étude.

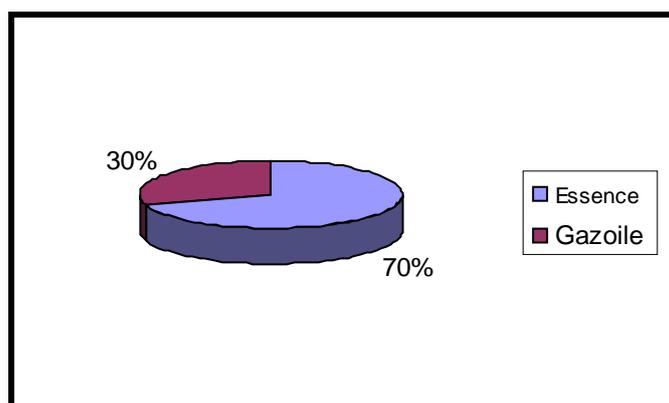
Le tableau n°03 nous donne le kilométrage et la densité des routes par commune.

**Tableau n°03 : Kilométrage et densité des routes par commune**

N°	Commune	Superficie (km <sup>2</sup> )	Linéaire (km)	Densité Des routes (km/km <sup>2</sup> )
1	Bouzareah	12,44	17,8	1,43
2	Bologhine	2,76	8,4	3,04
3	Bab El Oued	1,21	4,2	3,47
4	Oued Koriche	2,24	1,4	0,63
5	Casbah	1,08	8,55	7,92
6	Alger Centre	3,7	14,45	3,91
7	El Biar	4,08	9,8	2,40
8	Ben Aknoun	3,83	7,2	1,88
9	Hydra	6,12	6,4	1,05
10	El Mouradia	1,91	12,75	6,68
11	Sidi M'Hamed	2,18	14,60	6,70
12	Belouizdad	2,16	8,10	3,75
13	El Madania	2,17	11,70	5,39
14	Bir Mourad Rais	4,15	11,97	2,88
15	Birkhadem	8,89	17,70	1,99

## c) Parc automobile

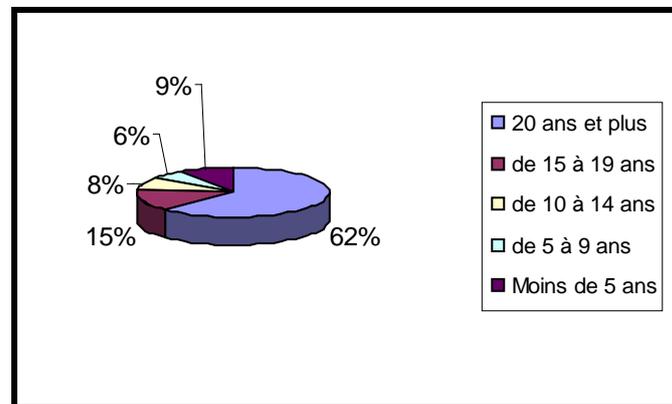
Le parc automobile d'Alger compte (au 31 décembre 2005) 748 446 véhicules tous types confondus, soit 23,31% du parc automobile nationale [8]. La direction des transports d'Alger estime le nombre de véhicules circulant à Alger à 980 000 et pourrait atteindre 4 millions en 2020 [9]. Plus des deux tiers du parc automobile roule à l'essence (figure n°23)



**Figure n°23 : Répartition du parc automobile selon le carburant utilisé [8]**

L'âge des véhicules est un paramètre essentiel pour l'étude de la pollution de l'air. Les anciens modèles ne sont pas équipés de pot catalytique et polluent plus qu'un véhicule neuf.

La figure n°24 nous donne la répartition de parc automobile selon la date de mise en circulation. Et en ressort que les trois quart du parc automobile a un âge supérieur à 15 ans.



**Figure n°24** : Répartition du parc automobile selon l'âge (année 2005) [8]

#### d) Industrie

Dans la zone d'étude, aucune activité industrielle susceptible d'émettre des COV n'est recensée. Il existe cependant un grand nombre de stations-services qui émettent des COV et BTEX par évaporation (tableau n°04)

**Tableau n°04** : Etat de stations de service en carburant

Commune	Nombre de stations services en activités	Capacités totales de stockages carburants (m <sup>3</sup> )
<b>Bouzareah</b>	-	-
<b>Bologhine</b>	01	98
<b>Bab El Oued</b>	01	33
<b>Oued Koriche</b>	02	20
<b>Casbah</b>	-	-
<b>Alger Centre</b>	07	190
<b>El Biar</b>	14	576,8
<b>Ben Aknoun</b>	01	39
<b>Hydra</b>	04	211
<b>El Mouradia</b>	01	30
<b>Sidi M'Hamed</b>	05	106
<b>Belouizdad</b>	06	191
<b>El Madania</b>	02	66
<b>Bir Mourad Rais</b>	02	49
<b>Birkhadem</b>	06	413

#### e) Forêts

Bien que le territoire de la wilaya d'Alger est très urbanisé mais on trouve quelques forêts surtout du coté Ouest de la wilaya. Le tableau n°5 résume les surfaces forestières dans la zone d'étude.

**Tableau n°05 : Etat des forêts des communes de la zone d'étude**

<b>Commune</b>	<b>Superficie forestière (Ha)</b>	<b>Espèces principales</b>
<b>Bouzareah</b>	77	Pin d'Alep, Eucalyptus, cyprès, Espèces ornementales
<b>Bologhine</b>	20	Pin pignon, Pin d'Alep
<b>Bab El Oued</b>	-	-
<b>Oued Koriche</b>	04	Eucalyptus
<b>Casbah</b>	-	-
<b>Alger Centre</b>	-	-
<b>El Biar</b>	05, 75	Pin d'Alep, Pin maritime, Eucalyptus
<b>Ben Aknoun</b>	190	Pin d'Alep, Eucalyptus, cyprès, Espèces ornementales
<b>Hydra</b>	26,05	Pin d'Alep, Eucalyptus, Caroubier, Casuarina, Espèces ornementales, Espèces forestières
<b>El Mouradia</b>	18	Pin d'Alep, Olivier
<b>Sidi M'Hamed</b>	05	Pin d'Alep
<b>Belouizdad</b>	60,12	Pin d'Alep, Espèces ornementales, Espèces locales et introduites
<b>El Madania</b>	23	Pin d'Alep, Olivier, Cyprès
<b>Bir Mourad Rais</b>	-	-
<b>Birkhadem</b>	22	Pin d'Alep, Cyprès

#### IV.3.2. Choix des sites et campagnes de mesure

Cette étude devrait être l'occasion de cerner, ponctuellement, l'impact des activités urbaines, industrielles et du trafic routier sur la qualité d'air.

Ainsi, les capteurs devaient être placés en sites à forte émissions de polluants et en sites urbains de fond caractérisés par une absence d'émissions directes.

Au-delà des cartographies de pollution de fond sur la zone d'Alger Centre et Centre Ouest, cette étude devrait également être l'occasion de cerner l'impact du trafic routier sur la qualité d'air.

A cet effet nous avons retenus deux types de site :

- Sites de proximité automobile (site du type « station trafic ») où l'exposition aux BTEX est maximale
- Sites urbains de fond qui donnent l'exposition moyenne de la population résidente ou de passage aux BTEX.

Pour déterminer l'emplacement des capteurs, un maillage à 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 élevée corresponde une maille resserrée, et inversement, 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 des critères stricts 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,
- Les tubes doivent être installés à 2-5 mètres de hauteurs pour éviter d'éventuels actes de vandalisme,
- Les supports utilisés sont des poteaux électriques, téléphoniques, des lampadaires, etc.
- Les sites de type station 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 importante de pollution

Sur la base de ces considérations, nous avons retenu 38 postes de mesures répartis sur les 15 communes. Dans certaines communes on a installé jusqu'à 4 postes de mesure. Le tableau n°06 résume la localisation et les coordonnées (longitude et latitude) des 20 sites de proximité automobile dénotés Pi et des 18 sites urbains de fond dénoté Fi.

Les postes de mesure sont fixés à une hauteur de 2 m (photo n°07 et n°08). L'image Google earth (figure n°25) illustre la position des sites sur la région d'Alger Centre et Ouest.

La figure n°26 présente la localisation des postes de mesure sur la carte d'Alger. L'annexe n°02 illustre la position de chaque poste de mesure.

En ces sites deux campagnes de mesure ont été réalisées :

- Une campagne de mesure estivale durant la période allant du 24 juillet au 14 août 2005.
- Une campagne de mesure hivernale de 7 au 22 février 2006.

Les températures moyennes enregistrées respectivement pendant les deux campagnes étaient de 28°C et 10°C

**Tableau n°06 : Emplacement des tubes échantillonneurs**

Référence de tube	Commune	Localisation	Coordonnées
P1	<b>Bab El Oued</b>	Lycée Said Touati	N 36°47'21.21'' E 3°02'47.13''
P2		Dar Donia rue Tazaiert	N 36°47'19.86'' E 3°03'18.36''
P3		Cabine radiologie rue Basta	N 36° 47'30.39'' E 3° 03'8.91''
P4		Cabine chirurgie dentaire rue Colonel Lotfi	N 36°47'27.78'' E 3°03'11.16''
F1	<b>Bologhine</b>	Polyclinique rue Ahmed Ziar	N 36°48'21.24'' E 3°02'27.24''
P5	<b>Oued Koriche</b>	Route vers Chevalley	N 36°47'9.06'' E 3°02'34.98''
P6	<b>Bouzareah</b>	Siège APC	N 36°47'25.08'' E 3°01'0.12''
F2		CRAG	N 36°47'48.12'' E 3°01'53.4''
F3	<b>Ben Aknoun</b>	Lycée Amara Rachid	N 36°45'42.84'' E 3°00'12.6''
P7		Commissariat	N 36°45'36.36'' E 3°00'48.6''
P8	<b>El Biar</b>	Place Kennedy	N 36°46'9.33'' E 3°01'49.62''
P9		CEM Mohamed Chwiter	N 36°46'2.1'' E 3°01'38.24''
F4		En face l'Hôpital Birtraria	N 36°46'25.32'' E 3°02'20.76''
P10	<b>Hydra</b>	Place El Kods	N 36°44'51.18'' E 3°02'23.82''
F5		ENA	N 36°45'08.01'' E 3°01'27.15''
F6	<b>El Mouradia</b>	Villa près de la présidence	N 36°44'35.42'' E 3°02'54.90''
F7		Villa près de la route vers Bir Mourad Rais	N 36°44'32.81'' E 3°03'04.09''
P11	<b>Bir Mourad Rais</b>	Institut du Froid	N 36°44'16.82'' E 3° 02'56.94''
P12		Autoroute	N 36°44'02.73'' E 3°02'19.20''
F8		Villa (les sources)	N 36°44'02.73'' E 3°03'14.62''
F9	<b>Birkhadem</b>	I.F.P	N 36°43'17.36'' E 3°02'53.55''
P13	<b>El Madania</b>	Rue Chouhada	N 36°44'59.85'' E 3°03'33.09''
F10		Lycée Mohamed Boudiaf	N 36°44'31.80'' E 3°04'07.96''
F11	<b>Belouizdad</b>	Dispensaire rue Cervantes	N 36°45'14.76'' E 3°03'36.9''
P14		Hamma rue Hassiba Ben Bouali	N 36°44'51.46'' E 3°05'04.73''
F12		Akiba	N 36°45'07.04'' E 3°03'42.89''
P15	<b>Sidi M'Hamed</b>	CEM près de Bazar	N 36°45'33.48'' E 3°03'5.4''
F13		Cabinet médicale rue Colonel Chabani	N 36°45'50.04'' E 3°03'4.68''
F14		Primaire Ibn Anas rue Mada Mohamed	N 36°45'34.71'' E 3°03'33.90''

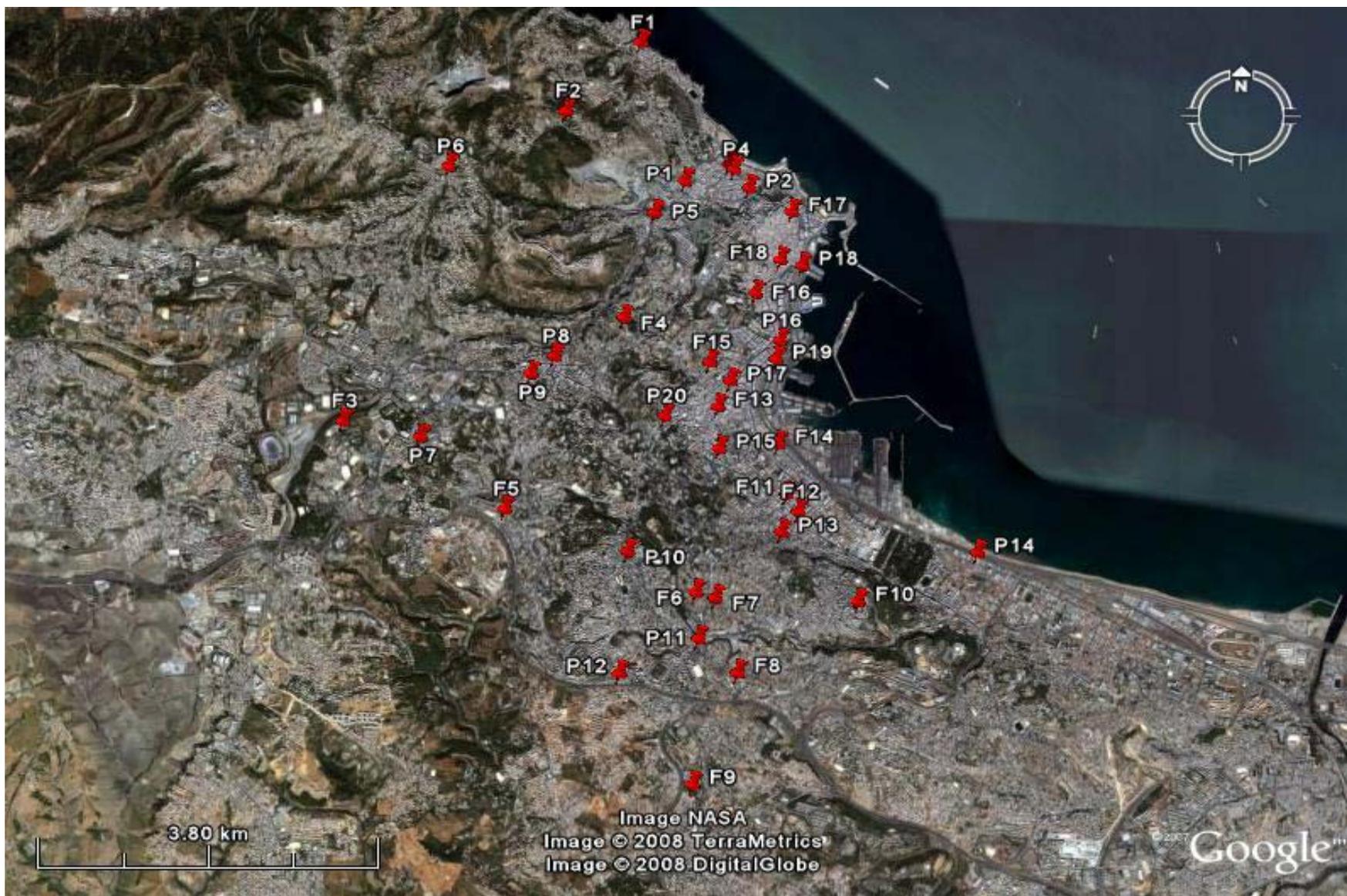
Référence de tube	Commune	Localisation	Coordonnées
F15	Alger Centre	Polyclinique Naftal rue des Moussabilines	N 36°46'8.04'' E 3°03'0.36''
F16		Ministère de la pêche	N 36°46'38.28'' E 3°03'21.96''
P16		SNTR Rue Colonel Amirouche	N 36° 46'17.4'' E 3°03'34.2''
P17		Bibliothèque Rue Didouche N°65	N 36°46'0.12'' E 3°03'10.44''
P18		La gare d'Alger	N 36°46'48.27'' E 3°03'43.38''
P19		Société de transport maritime (Algérie Ferries) Tafoura	N 36°46'9.66'' E 3° 03'31.5''
P20		Rue Krim Belkacem	N 36°45'45.54'' E 3°02'39.66''
F17	Casbah	Musée des Arts	N 36°47'10.5'' E 3°03'38.7''
F18		Commissariat Bouzrina	N 36°46'50.88'' E 3°03'33.60''



**Photo n°07** : Site de proximité automobile



**Photo n°08** : Site urbain de fond



**Figure n°25** : Image Google donnant la position des postes de mesure dans le Grand-Alger

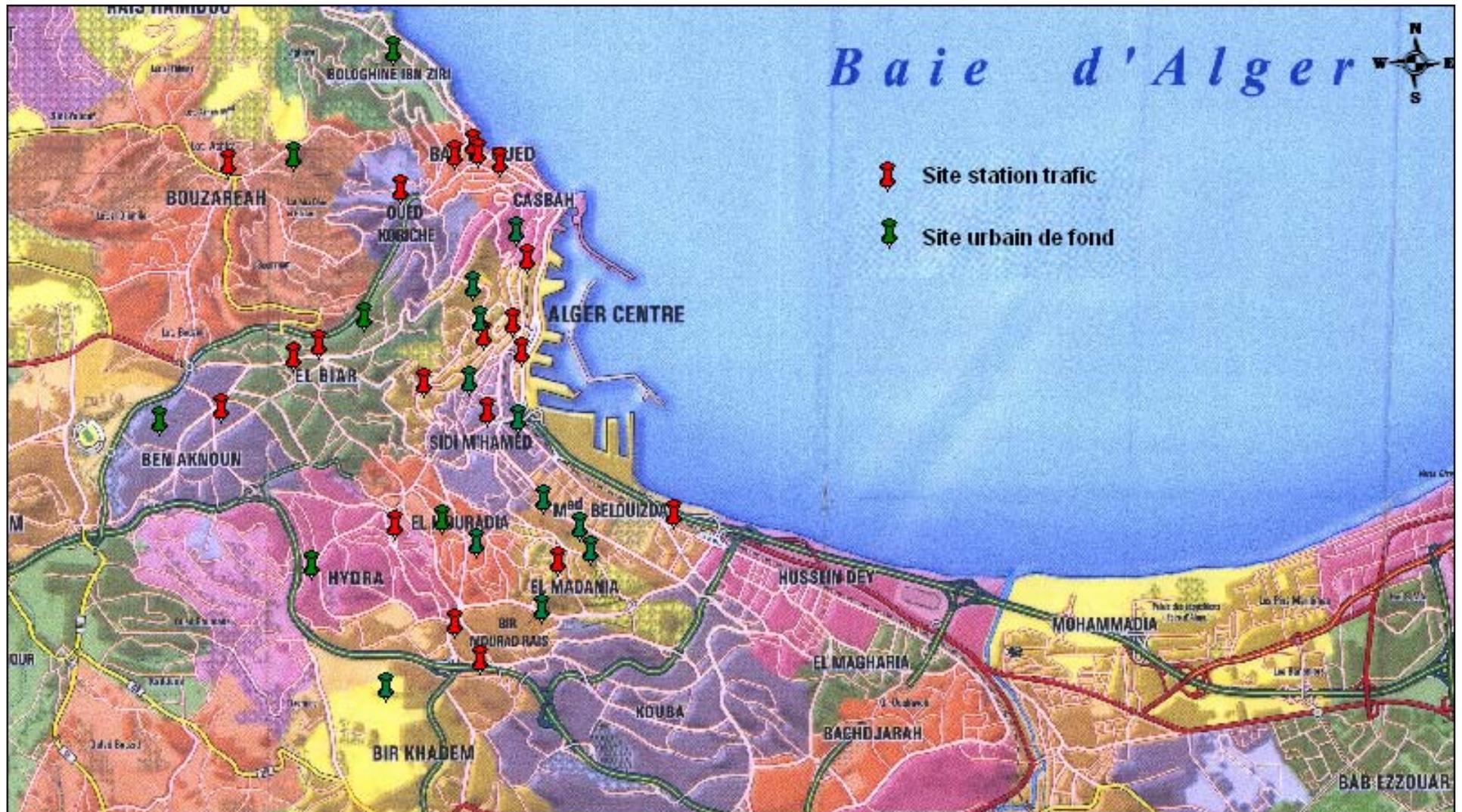


Figure n°26 : Localisation des postes de mesures sur la zone d'étude

## V. RESULTATS ET DISCUSSION

### V.1. Teneurs en BTEX

#### V.1.1. Temps de rétention des BTEX

Le temps de rétention des différents BTEX mesurés sur des substances étalons purs sont donnés en tableau n°07

Tableau n°07 : Temps de rétention des BTEX

	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	p-Xylène	m-Xylène	o-Xylène
<b>Temps de rétention (mn)</b>	4,7	7,4	11,6	12,9	13,6	15,3

A signaler ici que l'optimisation des conditions opératoires et le choix approprié de la colonne chromatographique ont 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. La figure n°27 présente le chromatogramme d'un échantillon analysé.

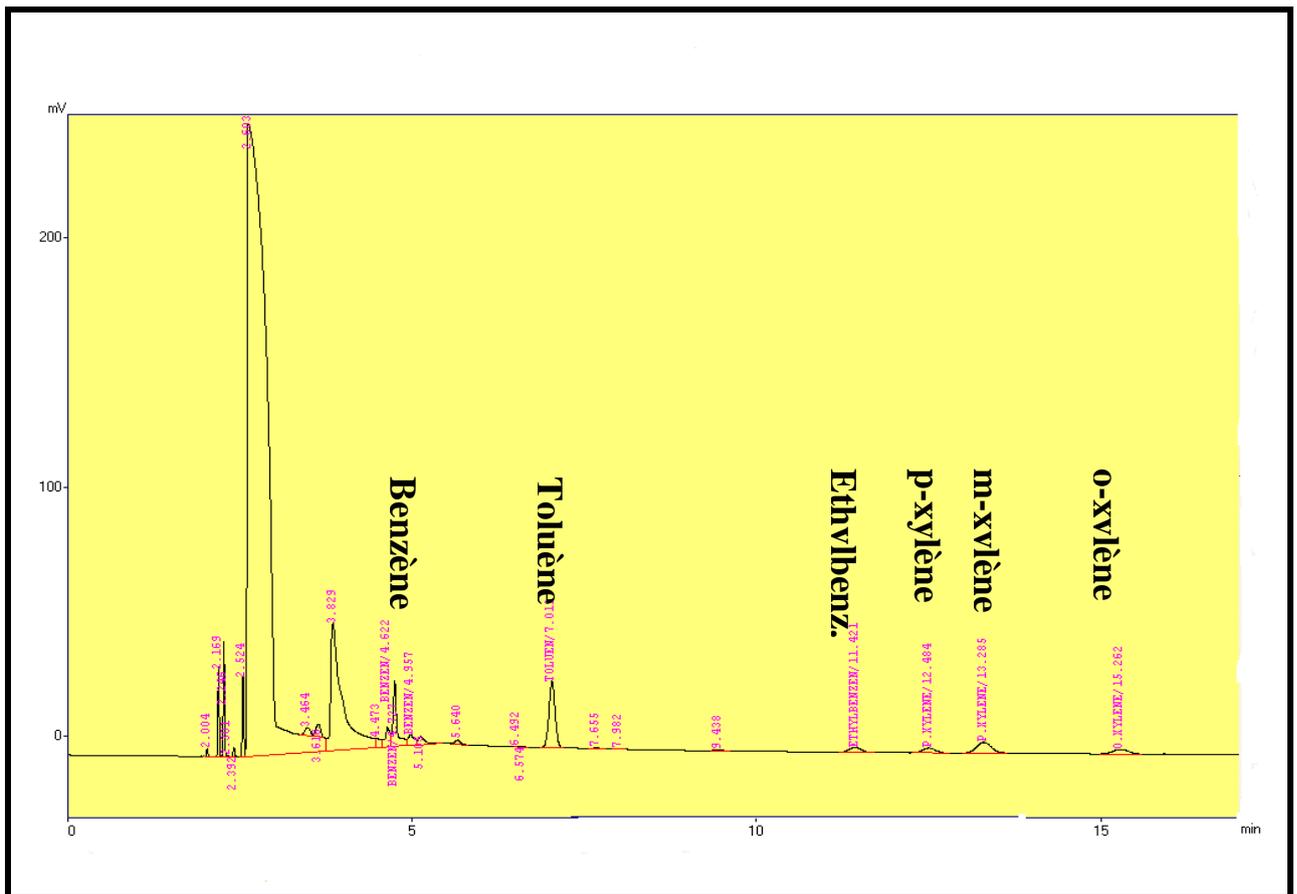


Figure n°27 : Chromatogramme CPG des BTEX mesurés à Didouche Mourad P17 en été

Les tableaux n°08 et 09 résument les teneurs moyennes en BTEX mesurées durant les deux campagnes, en sites urbains de fond et sites de proximité automobile respectivement. En tableaux n°10 et 11, nous résumons les teneurs moyennes et les teneurs extrêmes en BTEX.

**Tableau n°08 : Teneurs atmosphériques en BTEX mesurées en sites d'urbains de fond en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

Sites	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m-Xylène	p-Xylène	o-Xylène	BTEX Totaux
F1	0,64	1,08	0,10	0,47	0,19	0,12	2,60
F2	0,87	0,17	nd	nd	nd	nd	1,04
F3	1,11	0,42	nd	0,09	nd	nd	1,62
F4	0,08	0,83	nd	nd	nd	nd	0,91
F5	0,89	0,63	nd	0,15	nd	nd	1,67
F6	0,41	1,12	0,46	0,42	0,12	0,06	2,59
F7	0,77	0,92	0,15	0,37	0,11	0,09	2,41
F8	0,27	0,64	0,06	0,92	nd	nd	1,89
F9	0,14	0,56	0,27	0,07	0,25	nd	1,29
F10	0,20	0,63	nd	0,12	nd	nd	0,95
F11	0,47	1,89	0,21	0,57	0,23	0,15	3,52
F12	0,17	0,49	nd	0,17	nd	nd	0,83
F13	0,75	2,59	0,43	1,13	0,50	0,52	5,92
F14	0,29	0,73	nd	0,57	0,03	nd	1,62
F15	0,68	1,17	0,18	0,42	0,17	0,08	2,70
F16	0,14	1,13	nd	0,18	nd	nd	1,45
F17	0,46	2,74	0,07	0,40	0,07	nd	3,74
F18	0,65	1,13	0,15	0,53	0,20	0,24	2,90

nd : non décelable

**Tableau n°09 : Teneurs atmosphériques en BTEX mesurées en sites de proximité automobile en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

Sites	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m-Xylène	p-Xylène	o-Xylène	BTEX Totaux
P1	0,41	1,39	0,17	0,61	0,22	nd	2,80
P2	1,47	3,64	0,51	1,40	0,58	0,68	8,28
P3	1,70	3,27	0,47	1,34	0,20	0,26	7,24
P4	0,28	1,07	0,14	0,37	0,17	nd	2,03
P5	0,70	1,68	0,19	0,51	0,17	0,12	3,37
P6	0,66	0,87	0,07	0,15	0,11	nd	1,86
P7	0,22	1,12	0,10	0,26	0,11	0,14	1,95
P8	0,40	1,04	0,05	0,19	0,05	nd	1,73
P9	0,58	1,56	0,29	0,85	0,29	0,36	3,93
P10	0,30	1,26	0,13	0,36	0,07	nd	2,12
P11	0,84	2,12	0,32	0,76	0,44	0,40	4,88
P12	1,07	1,93	0,39	0,96	0,37	0,33	5,05
P13	1,11	1,92	0,32	0,82	0,36	0,36	4,89
P14	1,01	1,36	0,22	0,59	0,21	0,22	3,61
P15	0,30	0,90	1,57	0,32	0,07	0,06	3,22
P16	0,63	2,56	0,36	0,88	0,39	0,40	5,22
P17	1,33	3,20	0,44	1,22	0,46	0,49	7,14
P18	0,76	1,19	0,16	0,50	0,10	0,12	2,83
P19	1,16	2,44	0,42	1,10	0,42	0,57	6,11
P20	1,03	2,27	0,34	0,72	0,57	0,42	5,35

**Tableau n°10** : Teneurs moyennes et extrêmes des BTEX mesurées en sites urbains de fond en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethyl- benzène</b>	<b>m - Xylène</b>	<b>p - Xylène</b>	<b>o- Xylène</b>	<b>BTEX Totaux</b>	<b>Rapport Tol. /Benz.</b>
<b>Nombre de sites</b>	18	18	18	18	18	18	18	18
<b>Moyenne</b>	<b>0,50</b>	<b>1,05</b>	<b>0,12</b>	<b>0,37</b>	<b>0,10</b>	<b>0,07</b>	<b>2,20</b>	<b>3,18</b>
<b>Médiane</b>	0,47	0,92	0,07	0,40	0,07	nd	1,89	2,73
<b>Minimum</b>	0,08	0,17	nd	nd	nd	nd	0,83	0,20
<b>Maximum</b>	1,1	2,74	0,46	1,13	0,50	0,52	5,92	10,38
<b>Ecart type</b>	0,30	0,68	0,14	0,30	0,13	0,13	1,25	2,58

**Tableau n°11**: Teneurs moyennes et extrêmes des BTEX mesurées en sites de proximité automobile en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethyl- benzène</b>	<b>m - Xylène</b>	<b>p - Xylène</b>	<b>o- Xylène</b>	<b>BTEX Totaux</b>	<b>Rapport Tol. /Benz</b>
<b>Nombre de sites</b>	20	20	20	20	20	20	20	20
<b>Moyenne</b>	<b>0,80</b>	<b>1,84</b>	<b>0,33</b>	<b>0,70</b>	<b>0,27</b>	<b>0,25</b>	<b>4,18</b>	<b>2,63</b>
<b>Médiane</b>	0,76	1,68	0,32	0,72	0,22	0,26	3,93	2,48
<b>Minimum</b>	0,22	0,87	0,05	0,15	0,05	nd	1,73	1,32
<b>Maximum</b>	1,70	3,64	1,57	1,40	0,58	0,68	8,28	5,09
<b>Ecart type</b>	0,42	0,81	0,31	0,37	0,17	0,21	1,92	1,00

Il en résulte qu'en sites urbains la teneur moyenne en benzène, s'élève à  $0,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les BTEX totaux atteignent une teneur de l'ordre de  $2,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tableau n°10).

En sites de proximité automobile (tableau n°11), on enregistre une concentration plus élevée en benzène qui atteint  $0,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les BTEX totaux sont également plus élevés et atteignent un niveau de  $4,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Le rapport toluène/benzène moyen calculé pour les sites urbains et les sites de proximité automobile pendant les deux saisons, s'élève respectivement à 3,18 et 2,63. Ce rapport concorde avec les valeurs trouvées dans la littérature et signifie que les BTEX proviennent essentiellement du trafic routier [54 à 58].

L'examen des teneurs enregistrés en BTEX totaux dans les sites urbains, montre que la concentration maximale est observée dans le site F13 (cabinet médical à Sidi M'Hamed) pendant les deux campagnes d'échantillonnage. Ce site mal ventilé est proche de la rue Didouche Mourad qui connaît une grande densité de trafic routier. Les sites les moins pollués sont l'hôpital Birtraria et le lycée Mohamed Boudiaf (F4 et F10).

En hiver le site F2 (CRAG) est le site le moins pollué. Ce site est plus ou moins isolé et ce caractérise par une très bonne ventilation naturelle, un couvert végétal et une faible densité de population. Ce site accuse par ailleurs la teneur la plus basse en toluène. En été par contre, des teneurs anormalement élevées en benzène sont mesurées (plus de  $1,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Il est probable que les émissions naturelles de la végétation et surtout les actions de brûlage des déchets effectuées par la population limitrophe des bidonvilles sont à l'origine de ces émissions.

En ce qui concerne les sites de proximité automobile, on note que les sites P17 (Rue Didouche Mourad) et P3 (Cabinet radiologie rue Basta Ali à Bab El Oued) sont respectivement les sites les plus pollués en été et en hiver. Les sites les moins pollués sont P6 (Siège APC Bouzareah), P7 (Commissariat de Ben Aknoun) et P8 (place Kennedy à El Biar). L'intensité du trafic routier et le type de rue (rue ventilée ou rue de type canyon) conditionnent ainsi le niveau de pollution. La largeur de la rue présente aussi une influence. Une large avenue, même avec un trafic supérieur, est moins polluée car la dispersion des polluants est meilleure [59].

Les résultats du calcul des rapports  $\text{BTEX}_{\text{proximité}}/\text{BTEX}_{\text{urbain}}$  sur la totalité des sites sont présentés dans le tableau n°12 :

**Tableau n°12 : Rapport  $\text{BTEX}_{\text{proximité}}/\text{BTEX}_{\text{urbain}}$**

<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenzène</b>	<b>m-Xylène</b>	<b>p-Xylène</b>	<b>o-Xylène</b>	<b>BTEX totaux</b>
1,6	1,75	2,75	1,89	2,7	3,57	1,9

On remarque clairement que la pollution dans les sites de proximité automobile est plus élevée que celle des sites urbains de fond. En moyenne on a deux fois plus de BTEX en sites de proximité qu'en sites urbains.

Les sites de proximité automobile sont exposés directement aux émissions du trafic routier ce qui justifie cette importante différence.

Le plus faible rapport caractérise le benzène qui est peu réactif. En raison de leur très forte réactivité dans l'atmosphère [60], les composés éthylbenzène et xylènes (surtout l'o-xylène) diminuent fortement après leurs émissions et les rapports indiqués en tableau n°09 sont plus élevés que dans le cas du benzène et toluène.

## **V.2 Variation saisonnière des BTEX**

Les résultats de mesure des teneurs moyennes et extrêmes des BTEX selon le type de site et la saison (été, hiver) sont présentés dans les tableaux n°13, 14 et 15:

**Tableau n°13 :** Comparaison été-hiver des teneurs moyennes des BTEX en sites urbains de fond en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenz.</b>	<b>m-Xylène</b>	<b>p-Xylène</b>	<b>o-Xylène</b>	<b>BTEX Totaux</b>	<b>Rapport Toluène /Benzène</b>
<b>Eté</b>	0,69	1,33	0,12	0,39	0,09	0,11	2,76	3,69
<b>Hiver</b>	0,39	0,86	0,16	0,34	0,11	0,05	1,90	3,50

**Tableau n°14 :** Comparaison été-hiver des teneurs moyennes des BTEX en sites de proximité en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenz.</b>	<b>m-Xylène</b>	<b>p-Xylène</b>	<b>o-Xylène</b>	<b>BTEX Totaux</b>	<b>Rapport Toluène /Benzène</b>
<b>Eté</b>	0,98	1,91	0,27	0,73	0,27	0,27	4,42	2,62
<b>Hiver</b>	0,59	1,77	0,40	0,66	0,26	0,21	3,90	3,25

**Tableau n°15 :** Comparaison été-hiver des teneurs moyennes des BTEX pour l'ensemble des sites en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenz.</b>	<b>m-Xylène</b>	<b>p-Xylène</b>	<b>o-Xylène</b>	<b>BTEX Totaux</b>	<b>Rapport Toluène /Benzène</b>
<b>Eté</b>	0,86	1,66	0,20	0,59	0,20	0,20	3,71	3,08
<b>Hiver</b>	0,51	1,39	0,30	0,52	0,21	0,14	3,06	3,35

Ces tableaux montrent que les teneurs enregistrées pendant la campagne estivale sont plus élevées que les teneurs hivernales sauf dans le cas de l'éthylbenzène où c'est l'inverse qui se produit. Le rapport de la variation des teneurs des BTEX entre les deux saisons est présenté dans le tableau n°16

**Tableau n°16 :** Rapport  $\text{BTEX}_{\text{Hiver}}/\text{BTEX}_{\text{été}}$

<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenzène</b>	<b>m+p-Xylène</b>	<b>o-Xylène</b>	<b>BTEX totaux</b>
0,59	0,84	1,5	0,91	0,7	0,82

D'après ces résultats, on constate que quelque soit le type de site, il y a une diminution hivernale des BTEX qui est comprise entre 10% et 40%.

Plusieurs études [61, 62 et 63] montrent qu'en général c'est l'inverse qui se produit. En effet les BTEX devaient diminuer en été sous l'effet de la photochimie.

Le comportement saisonnier des BTEX à Alger est probablement dû à la forte volatilité du carburant utilisé. Les véhicules à essence sont soumis à diverses pertes d'hydrocarbures par évaporation. Celles-ci se manifestent surtout en période estivale et à divers stades de l'utilisation du véhicule c'est-à-dire :

- Lors de l'approvisionnement en station-service ;
- En stationnement prolongé à l'extérieur ;
- A l'arrêt, moteur au ralenti ;
- En circulation, quel que soit le type de parcours [64].

Par ailleurs, l'état âgé du parc automobile algérien accentue cette évaporation. Il est aussi possible qu'une partie de l'évaporation provient des travaux de peinture que les Algériens entreprennent le plus souvent en été. On est ainsi devant une situation où la forte évaporation (augmentation des teneurs) l'emporterait sur les réactions photochimiques (diminution des teneurs).

Par contre, dans le cas de l'éthylbenzène qui est de loin l'aromat le plus réactif [60], c'est la diminution estivale qui prédomine.

Il faut signaler aussi qu'à l'inverse des pays européens, en Algérie, le chauffage domestique n'est pas très répandu et il n'utilise comme énergie que le gaz naturel qui ne contribue pas à l'accroissement des BTEX en hiver.

Lors d'une étude effectuée à Alger sur la pollution de l'air par les COV en 1996, les teneurs maximales enregistrées en benzène et en toluène sont observées au mois de juin (été) [65]. La littérature rapporte toutefois d'autres études comme celle effectuée dans la ville d'Oslo où les concentrations en benzène et en toluène sont plus importantes en période chaude qu'en période froide, alors que les concentrations des xylènes restent inchangées [66].

### **V.3 Comparaison inter-communes des niveaux de pollution par les BTEX**

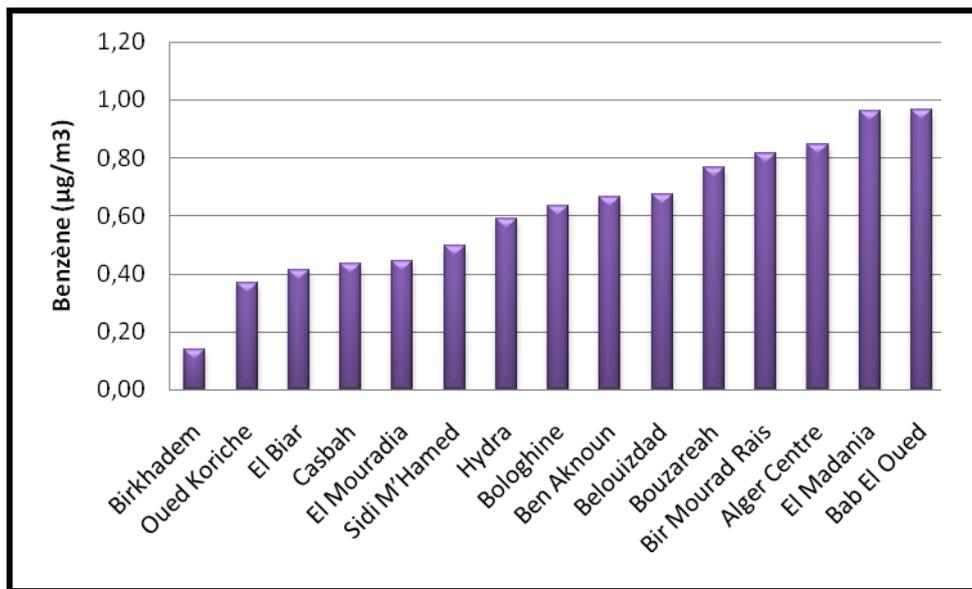
L'étude des niveaux de pollution par commune est présentée en figures n°28 à 34 pour les différents BTEX et les BTEX totaux.

On note que les communes de Bab El Oued, El Madania et à un degré moindre celles de Bir Mourad Rais et Alger Centre sont les communes les plus polluées de la zone d'étude dans presque tous les cas de figures.

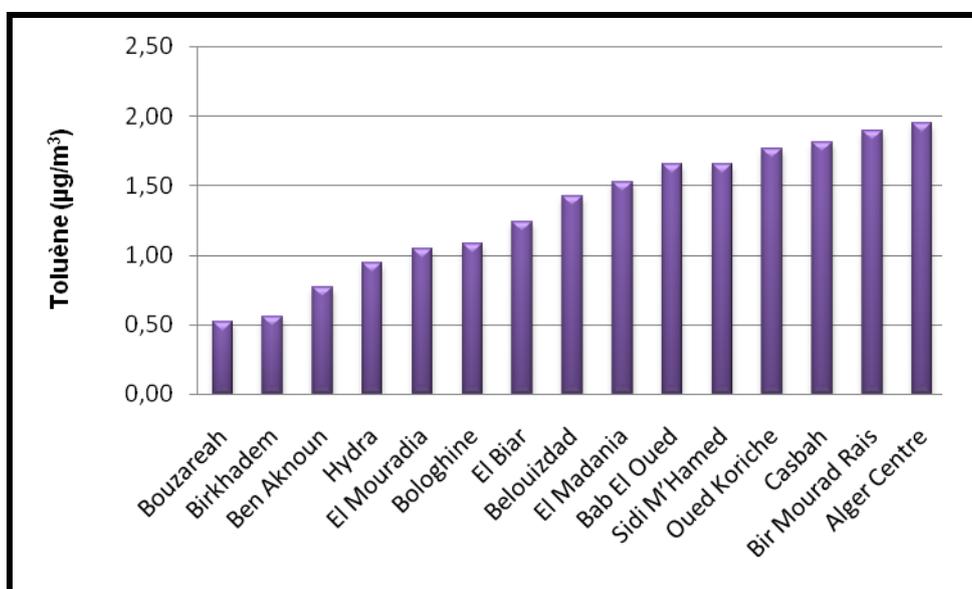
La commune de Bir Mourad Rais bien que relativement peu peuplée est connue comme étant la porte d'Alger pour les Wilayas de l'ouest du pays. Il y règne un grand trafic sur ses axes routiers.

En plus de la forte densité de population de Bab El Oued, El Madania et Alger-Centre, ces trois communes connaissent une grande activité commerciale. Elles sont caractérisées par la présence d'un bâti très dense qui empêche la ventilation naturelle et donc le transport et la dilution des polluants.

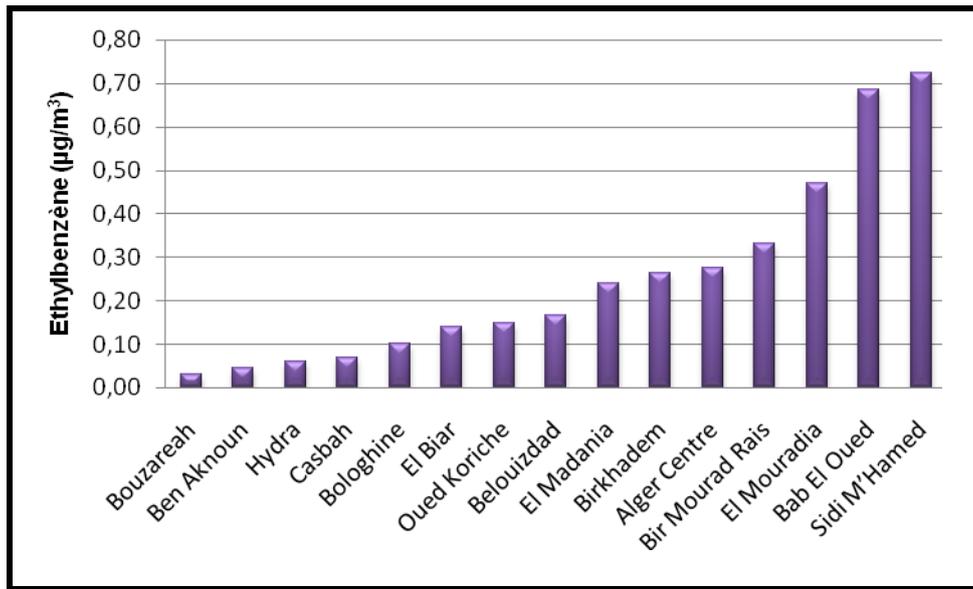
On note aussi que la commune de la Casbah enregistre des teneurs élevées en toluène par rapport aux autres communes, qui s'approche aux teneurs d'Alger Centre et Bir Mourad Rais. Une cartographie de la distribution de la pollution va nous permettre de bien localiser les zones les plus polluées.



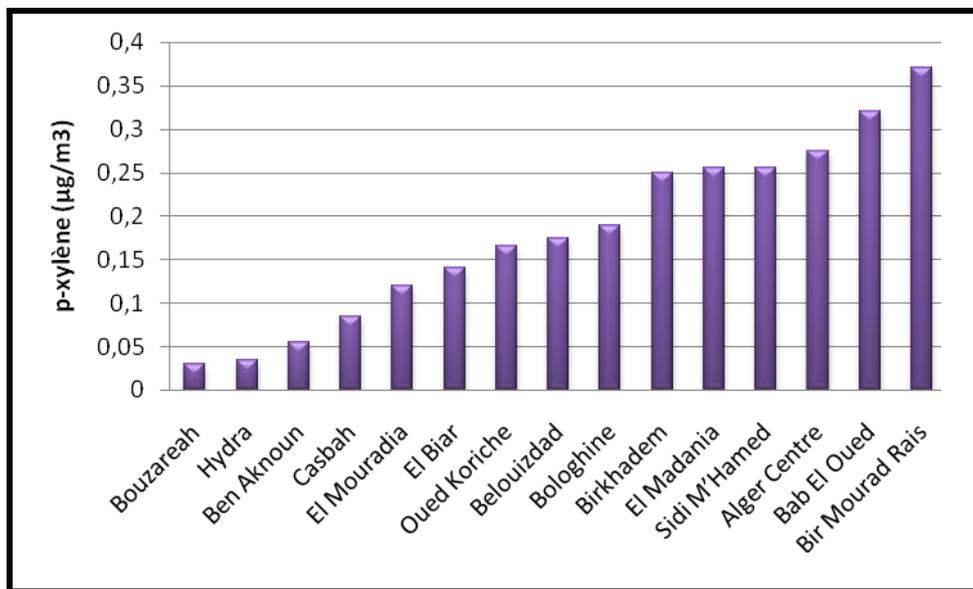
**Figure n°28:** Teneurs atmosphériques moyennes en benzène par commune



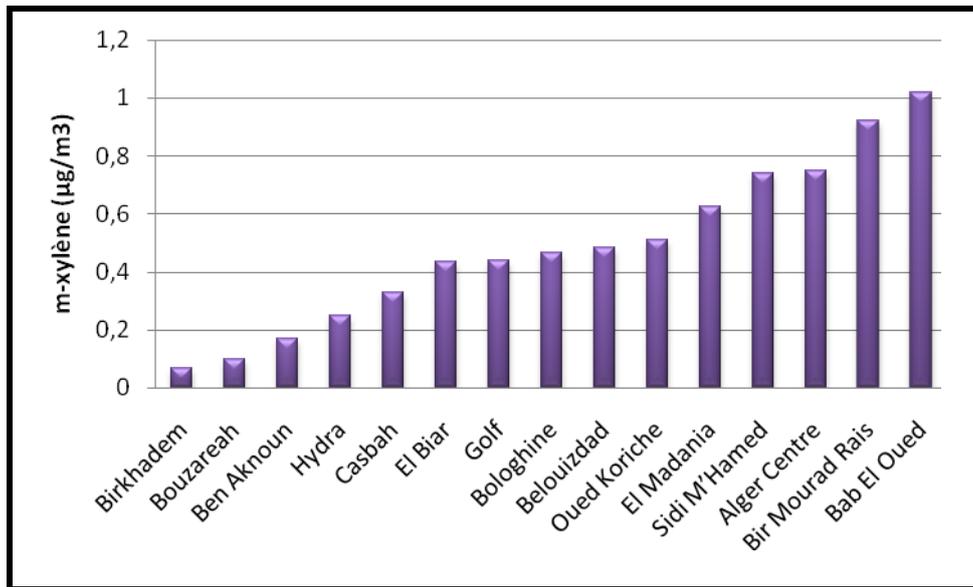
**Figure n°29:** Teneurs atmosphériques moyenne en toluène par commune



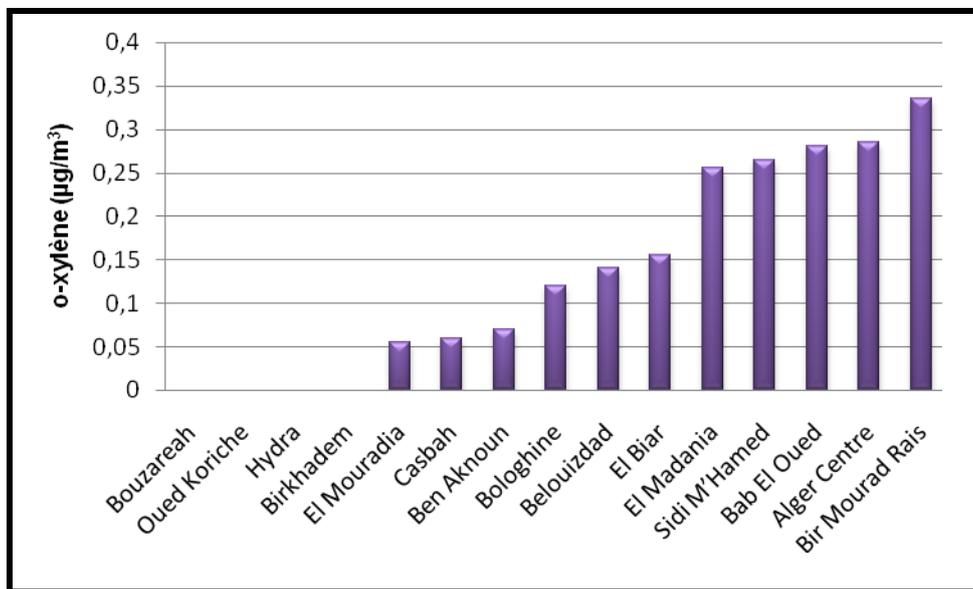
**Figure n°30:** Teneurs atmosphériques moyennes en éthylbenzène par commune



**Figure n°31:** Teneurs atmosphériques moyennes en p-xylène par commune

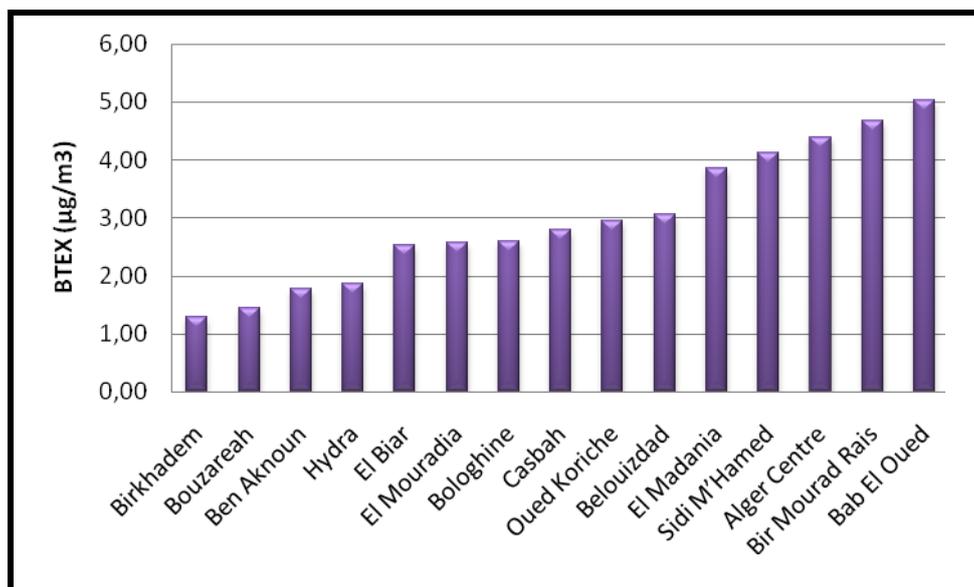


**Figure n°32:** Teneurs atmosphériques moyennes en m-xylène par commune



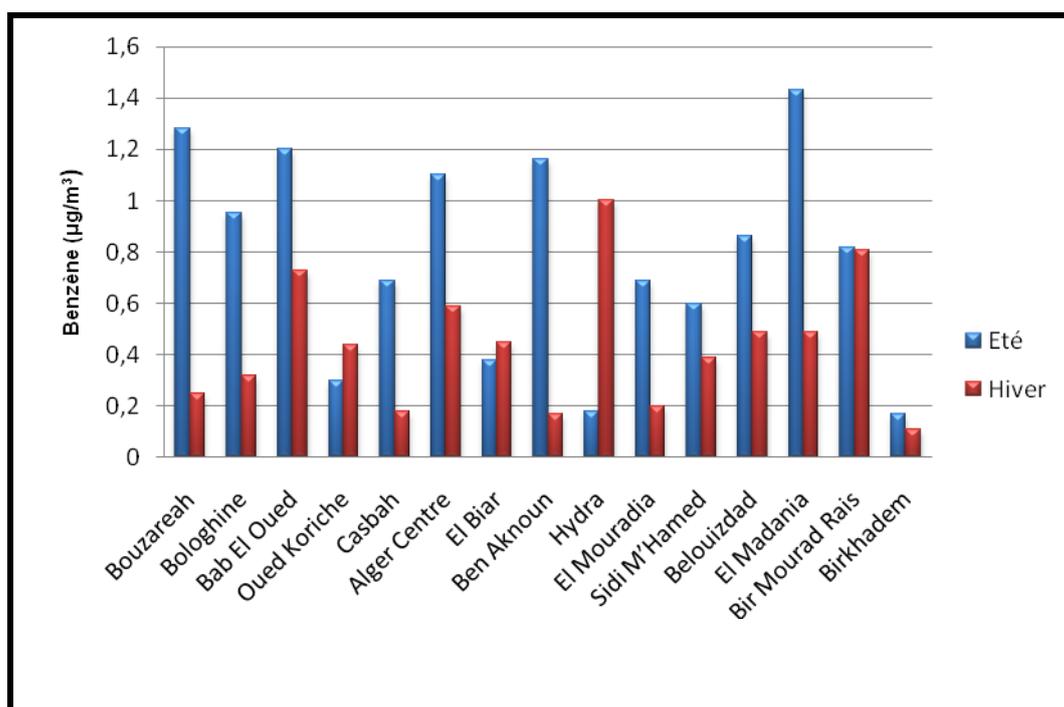
**Figure n°33:** Teneurs atmosphériques moyennes en o-xylène par commune

En terme de BTEX totaux, les communes les moins touchées par la pollution sont Birkhadem, Bouzareah et Ben Aknoun. Ce sont des Communes vastes à faible densité de population et situées sur les hauteurs et en périphérie du centre ville.



**Figure n°34:** Teneurs atmosphériques moyennes en total BTEX par commune

Les figures n°35 et 36 illustrent les variations saisonnières du benzène et des BTEX totaux par commune. On y trouve le rapport été/hiver qui est supérieur à l'unité même à l'échelle des communes. L'ampleur des teneurs hivernales au benzène mesurée à Hydra, reste pour l'instant inexplicé, probablement un rejet accidentel.



**Figure n°35:** Teneurs atmosphériques saisonnières en benzène par commune

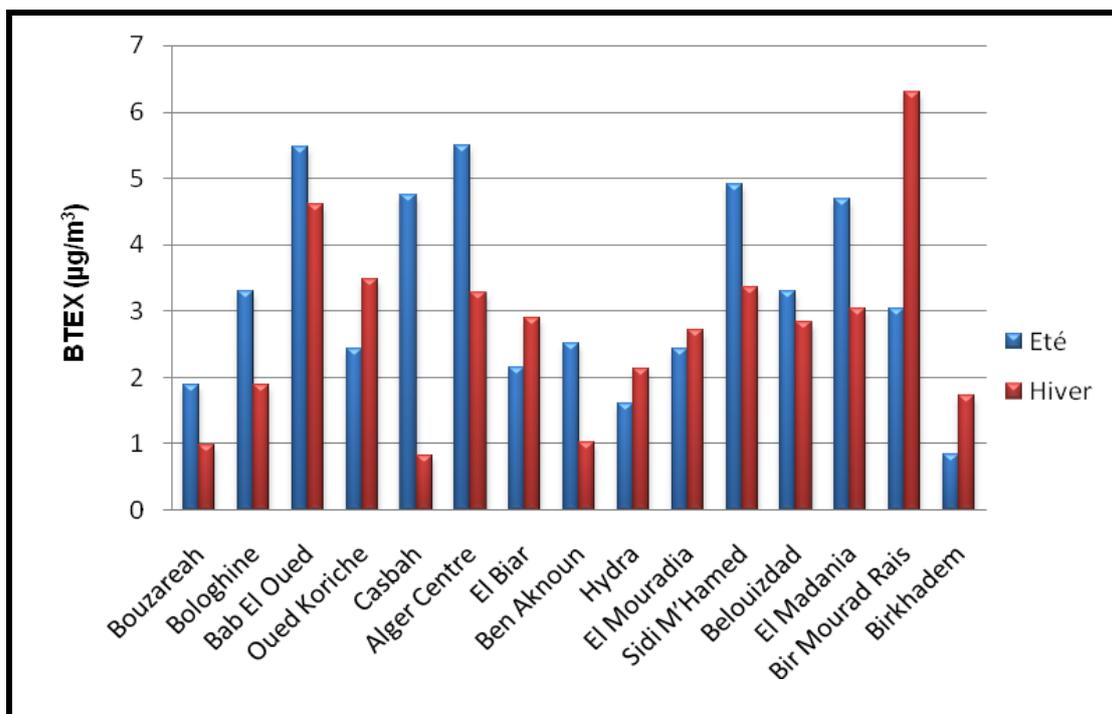


Figure n°36: Teneurs atmosphériques saisonnières en total BTEX par commune

#### V.4. Corrélations entre les polluants

Les matrices de corrélations entre les différents BTEX sont présentées dans les tableaux n°17 à 20 :

Tableau n°17 : Matrice des facteurs des corrélations  $R^2$  des BTEX (sites urbains) en période estivale

	Benzène	Toluène	Ethylbenz.	p-xylène	m-xylène	o-xylène	Total BTEX
Benzène	1	0,21	0,50	0,47	0,31	0,41	0,50
Toluène	0,21	1	0,83	0,85	0,86	0,67	0,78
Ethylbenz.	0,50	0,83	1	0,97	0,73	0,86	0,92
p-xylène	0,47	0,85	0,97	1	0,66	0,89	0,94
m-xylène	0,31	0,86	0,73	0,66	1	0,73	0,86
o-xylène	0,41	0,67	0,86	0,89	0,73	1	0,86
Total BTEX	0,50	0,78	0,92	0,94	0,86	0,86	1

**Tableau n°18** : Matrice des facteurs des corrélations  $R^2$  des BTEX (sites urbains) en période hivernale

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenz.</b>	<b>p-xylène</b>	<b>m-xylène</b>	<b>o-xylène</b>	<b>Total BTEX</b>
<b>Benzène</b>	1	0,90	0,82	0,78	0,70	0,61	0,77
<b>Toluène</b>	0,90	1	0,85	0,87	0,72	0,68	0,86
<b>Ethylbenz.</b>	0,82	0,87	1	0,89	0,55	0,73	0,86
<b>p-xylène</b>	0,78	0,87	0,89	1	0,68	0,65	0,74
<b>m-xylène</b>	0,70	0,72	0,55	0,68	1	0,64	0,79
<b>o-xylène</b>	0,61	0,68	0,73	0,65	0,64	1	0,57
<b>Total BTEX</b>	0,77	0,86	0,86	0,74	0,79	0,57	1

**Tableau n°19** : Matrice des facteurs des corrélations  $R^2$  des BTEX (sites de proximité) en période estivale

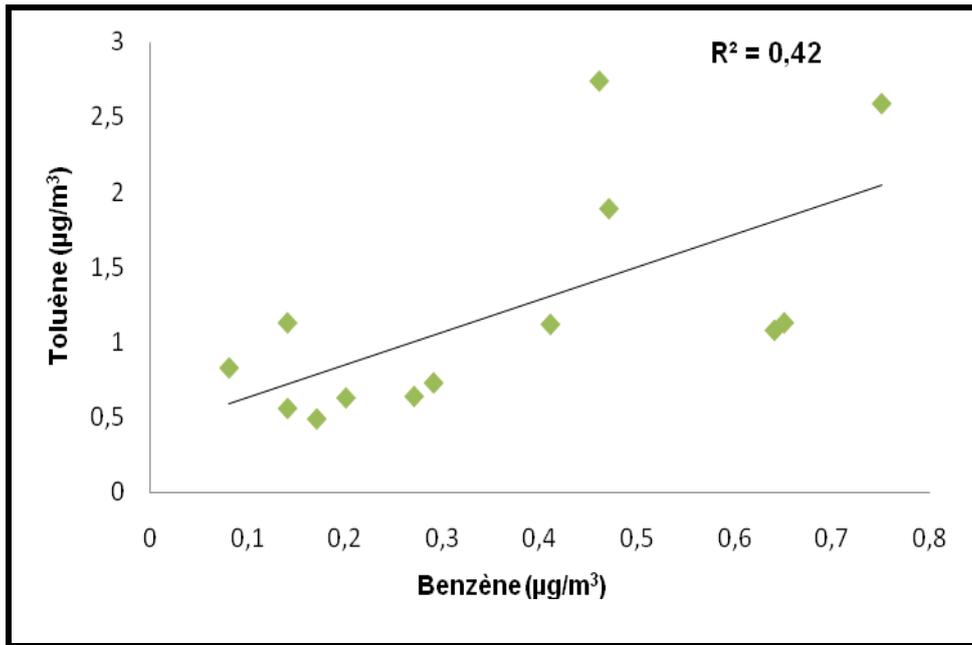
	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenz.</b>	<b>p-xylène</b>	<b>m-xylène</b>	<b>o-xylène</b>	<b>Total BTEX</b>
<b>Benzène</b>	1	0,57	0,61	0,54	0,64	0,56	0,68
<b>Toluène</b>	0,57	1	0,94	0,93	0,93	0,79	0,95
<b>Ethylbenz.</b>	0,61	0,94	1	0,98	0,99	0,92	0,97
<b>p-xylène</b>	0,54	0,93	0,99	1	0,98	0,90	0,97
<b>m-xylène</b>	0,64	0,93	0,99	0,98	1	0,93	0,98
<b>o-xylène</b>	0,56	0,79	0,92	0,90	0,93	1	0,90
<b>Total BTEX</b>	0,68	0,95	0,97	0,97	0,98	0,90	1

**Tableau n°20** : Matrice des facteurs des corrélations  $R^2$  des BTEX (sites de proximité) en période hivernale

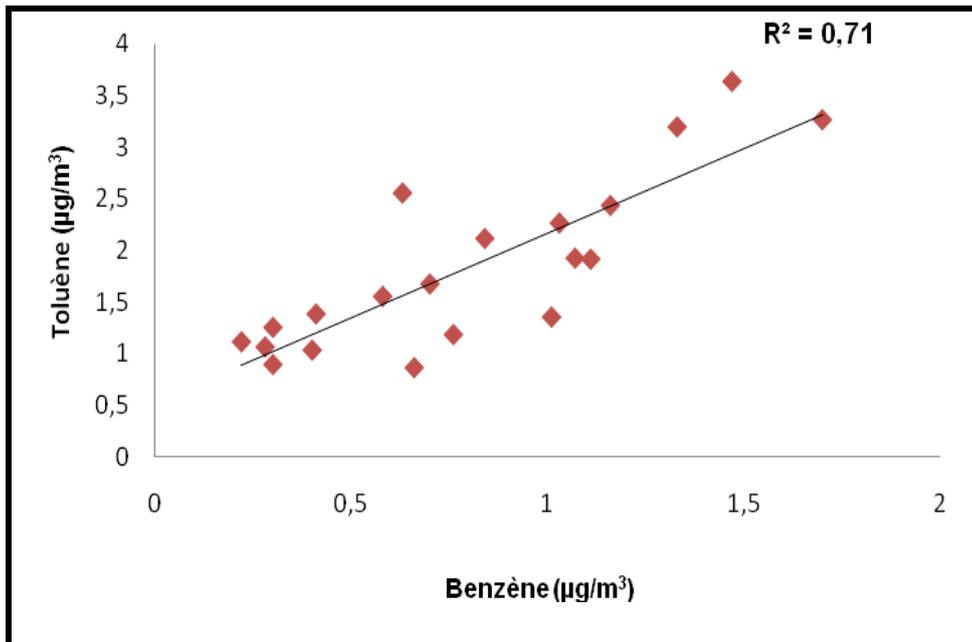
	<b>Benzène</b>	<b>Toluène</b>	<b>Ethylbenz.</b>	<b>p-xylène</b>	<b>m-xylène</b>	<b>o-xylène</b>	<b>Total BTEX</b>
<b>Benzène</b>	1	0,84	0,78	0,77	0,80	0,77	0,80
<b>Toluène</b>	0,84	1	0,81	0,83	0,81	0,82	0,82
<b>Ethylbenz.</b>	0,78	0,81	1	0,87	0,94	0,86	0,93
<b>p-xylène</b>	0,77	0,83	0,87	1	0,83	0,85	0,80
<b>m-xylène</b>	0,80	0,81	0,94	0,83	1	0,77	0,84
<b>o-xylène</b>	0,77	0,82	0,86	0,85	0,77	1	0,82
<b>Total BTEX</b>	0,80	0,82	0,93	0,80	0,84	0,82	1

Les figures n°37 et 38 illustrent à titre d'exemple les corrélations benzène/toluène en sites urbains et sites de proximité pour les deux campagnes.

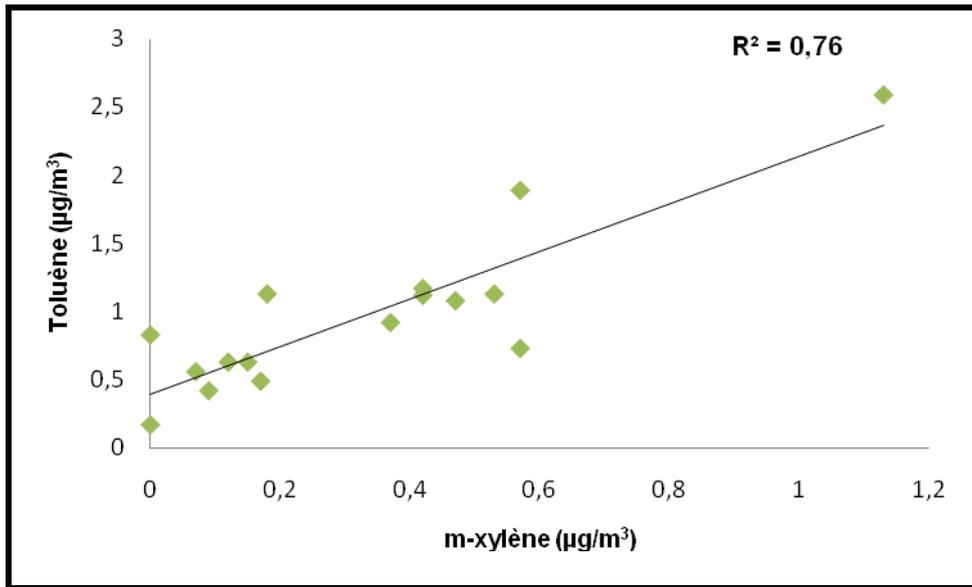
Les corrélations toluène/m-xylène, toluène/BTEX totaux et m-xylène/BTEX totaux sont données respectivement en figures n°39, 40, 41 et 42, 43, 44 respectivement pour les sites urbains et sites de proximité.



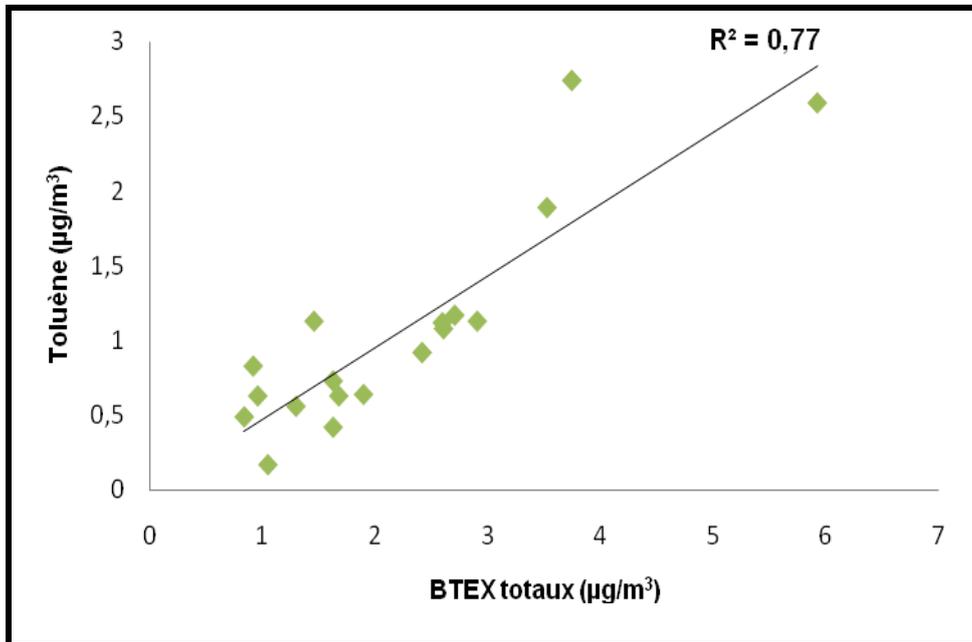
**Figure n°37** : Corrélation benzène/toluène en sites urbains



**Figure n°38** : Corrélation benzène/toluène en sites de proximité



**Figure n°39 :** Corrélation toluène/m-xylène en sites urbains



**Figure n°40:** Corrélation toluène/BTEX totaux en sites urbains

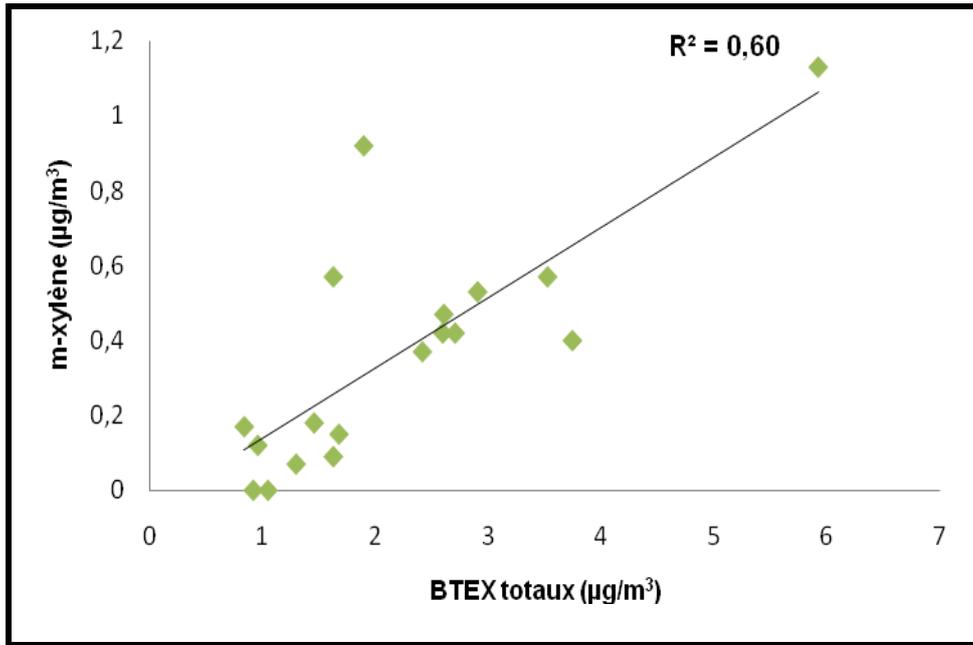


Figure n°41: Corrélation m-xylène/BTEX totaux en sites urbains

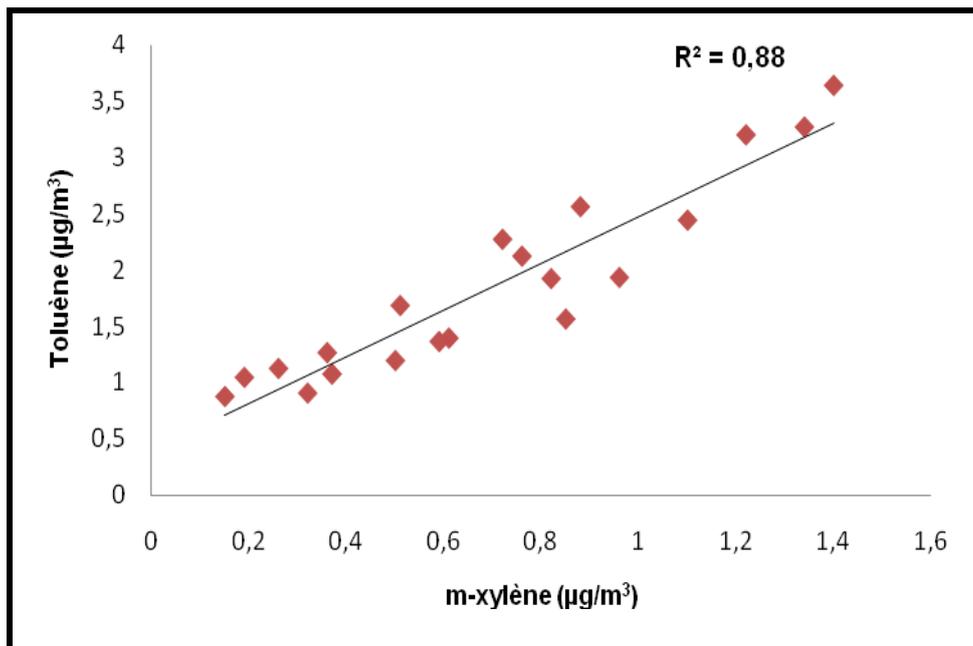
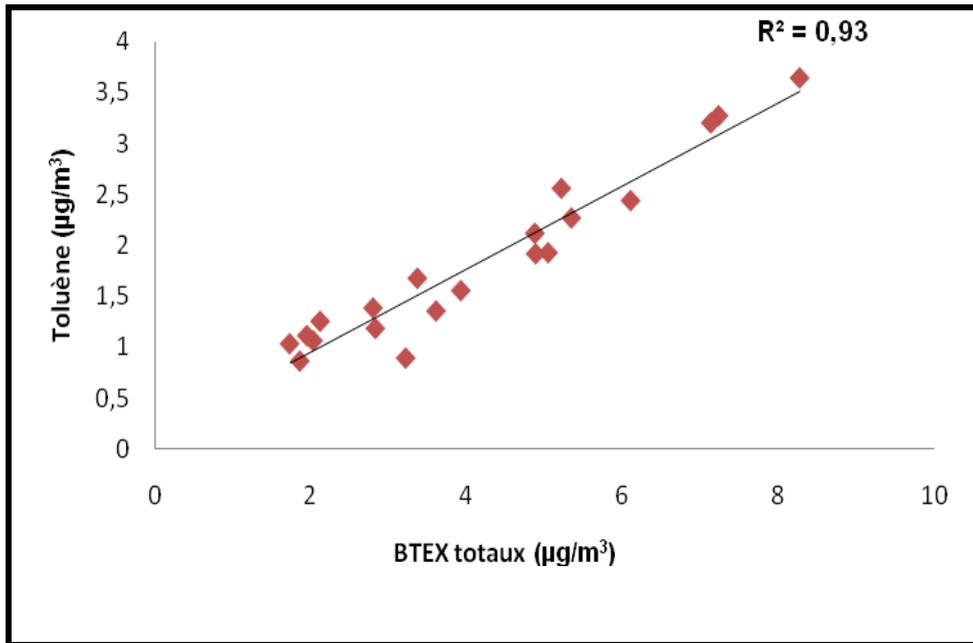
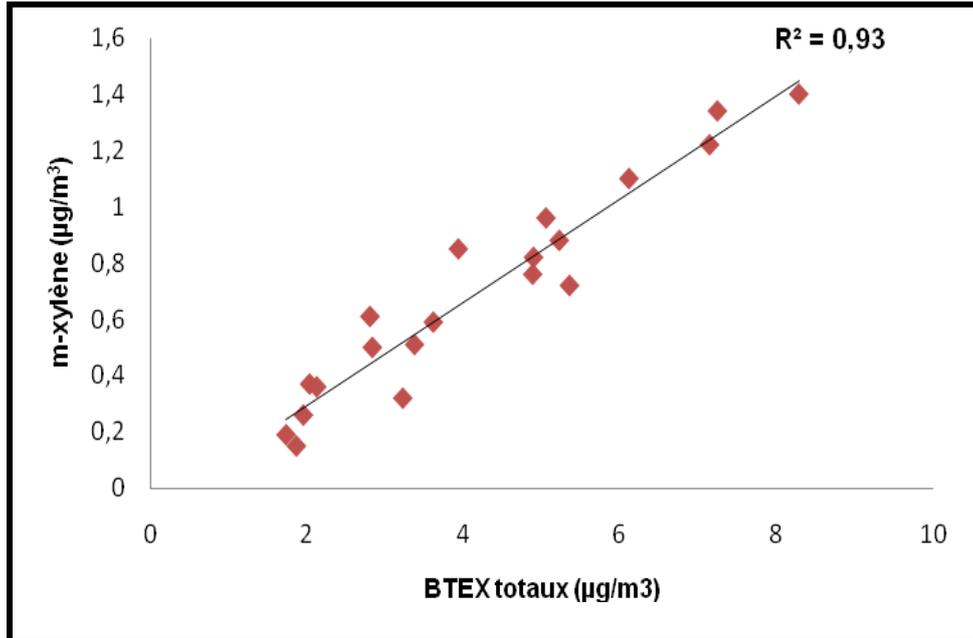


Figure n°42 : Corrélation toluène /m-xylène en sites de proximité



**Figure n°43 :** Corrélation toluène/BTEX totaux en sites de proximité



**Figure n°44:** Corrélation m-xylène/BTEX totaux en sites de proximité

L'étude des corrélations entre les différents BTEX montre que les meilleures corrélations sont obtenues dans les sites de proximité automobiles pendant les deux campagnes. Ceci est normal étant donné que les émissions automobiles n'ont pas subi l'influence du milieu, ni la dilution ni le transport. En sites urbains par contre, il peut y avoir réactions chimiques durant le transport, mélange avec les BTEX issues de sources diffuses etc.

Les faibles facteurs de corrélations entre le benzène et les différents BTEX en été dans les deux types de sites, suggèrent qu'il y a des sources d'émission de benzène que celles du trafic routier en ces sites [67].

Effectivement, la période estivale connaît un grand nombre d'incendie de forêts qui est une source biogénique de benzène. Le brûlage anarchique des déchets ménagers par la population est aussi une source non négligeable dans cette saison. La grande teneur enregistrée en benzène dans le site F2 (CRAG Bouzareah), en période estivale, est un exemple concret de cette hypothèse.

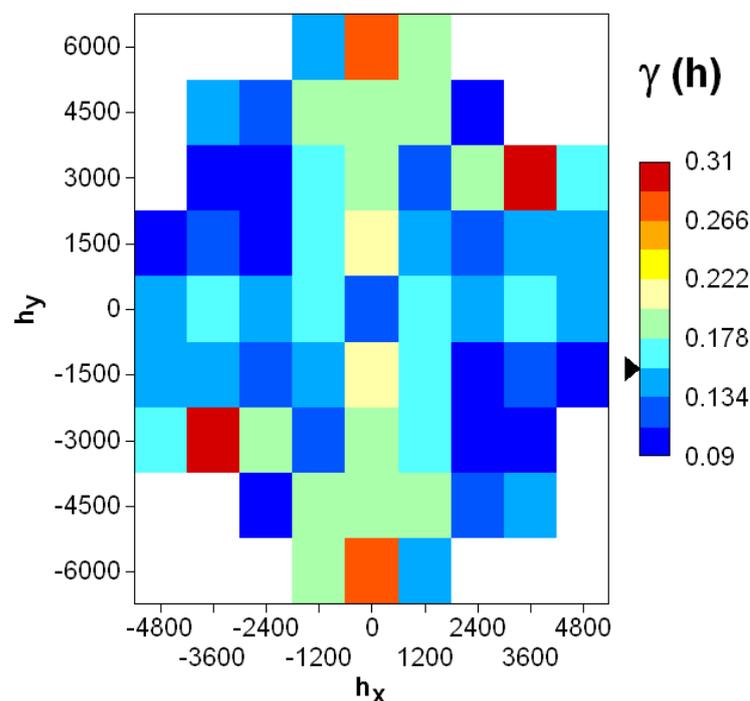
En période hivernale, les sources de pollution par les BTEX hors le trafic routier diminuent. Les matrices des corrélations nous confirment que les BTEX sont presque tous émis de la même source, majoritaire le trafic routier.

## V.5. Cartographie de la distribution de la pollution par les BTEX

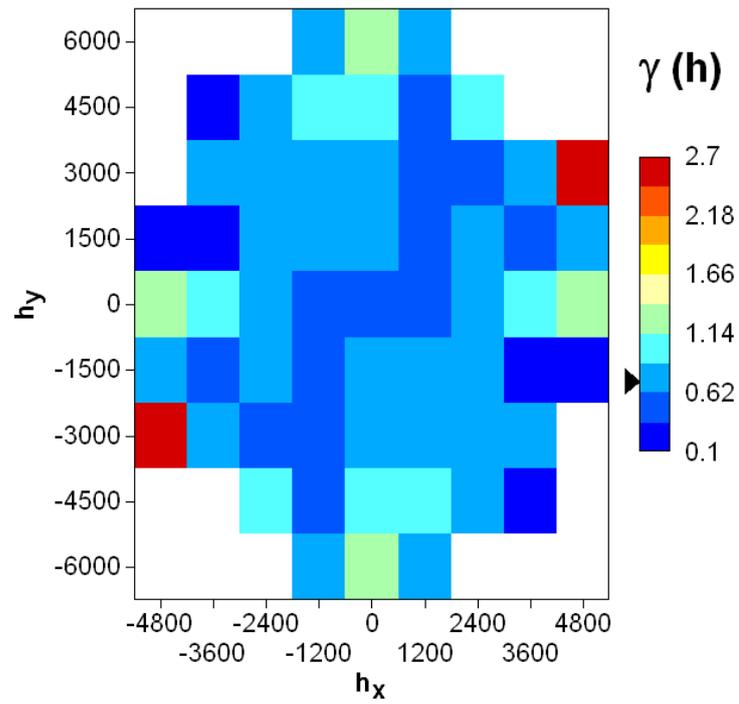
La réalisation de la cartographie de la pollution par les BTEX, passe par les deux principales étapes suivantes :

- L'analyse de la structure spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel « VARIOWIN »
- Le krigeage, on utilisant le logiciel « SURFER 8 »

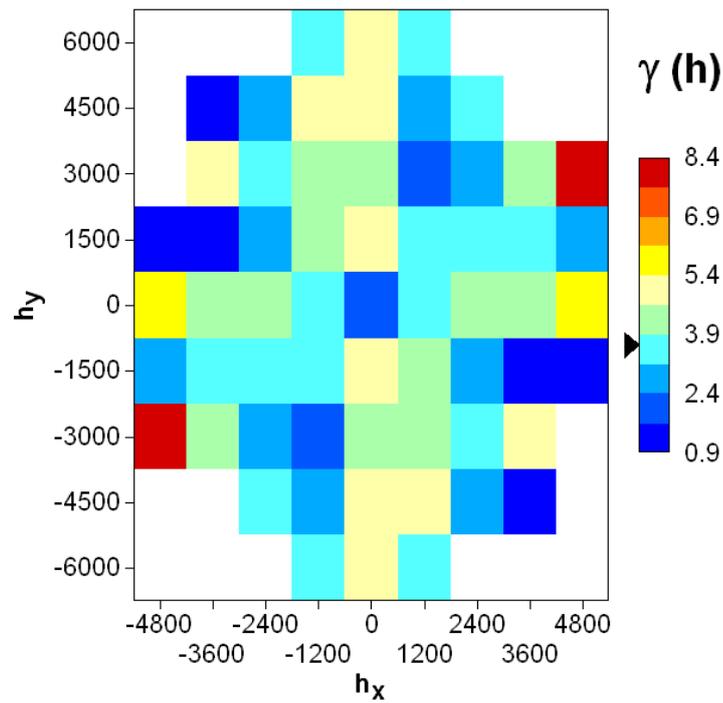
Les figures n°45, 46 et 47 présentent les différents variogrammes surfaciques de benzène, toluène et total BTEX (les variogrammes surfaciques selon la saison sont présentés dans l'annexe n°03). D'après ces variogrammes observées, on constate qu'il n'y a pas une direction privilégiée de la pollution. C'est due peut être au trafic routier que connaît Alger et qui est répartie d'une façon plus ou moins régulière sur le territoire de la Wilaya.



**Figure n°45 :** Variogramme surfacique de benzène

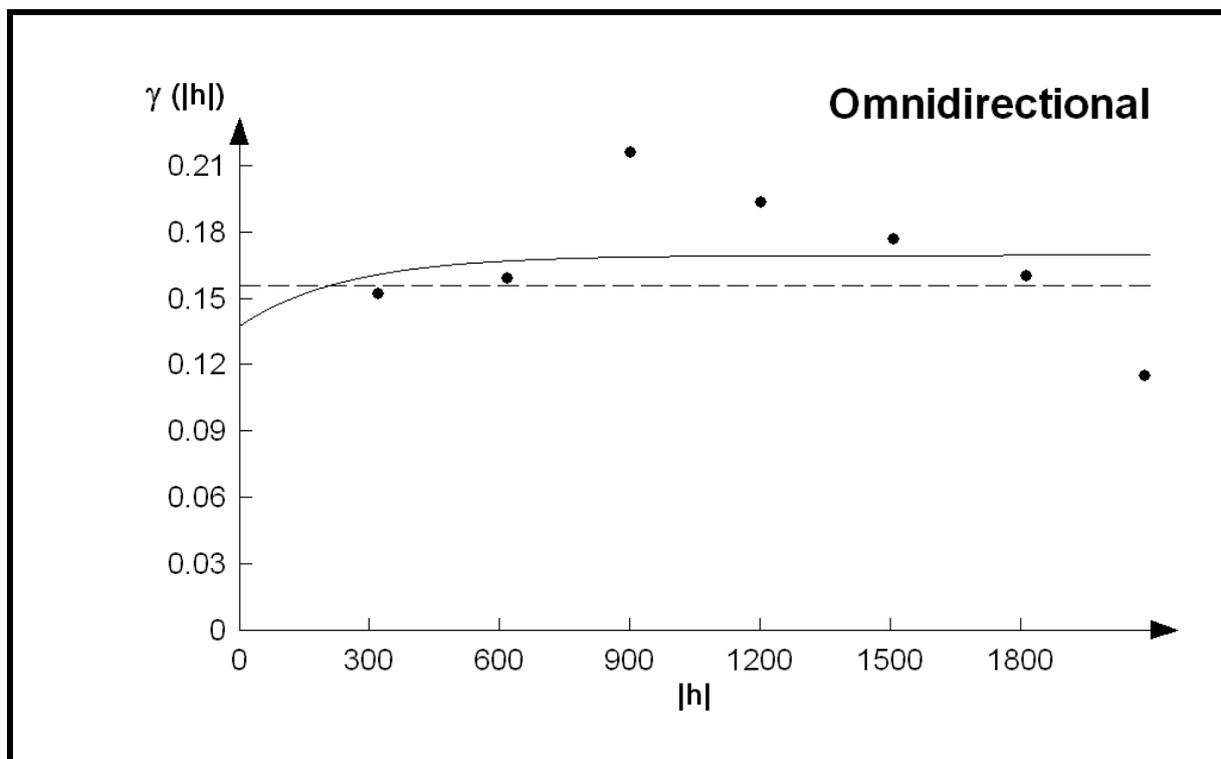


**Figure n°46 :** Variogramme surfacique de toluène

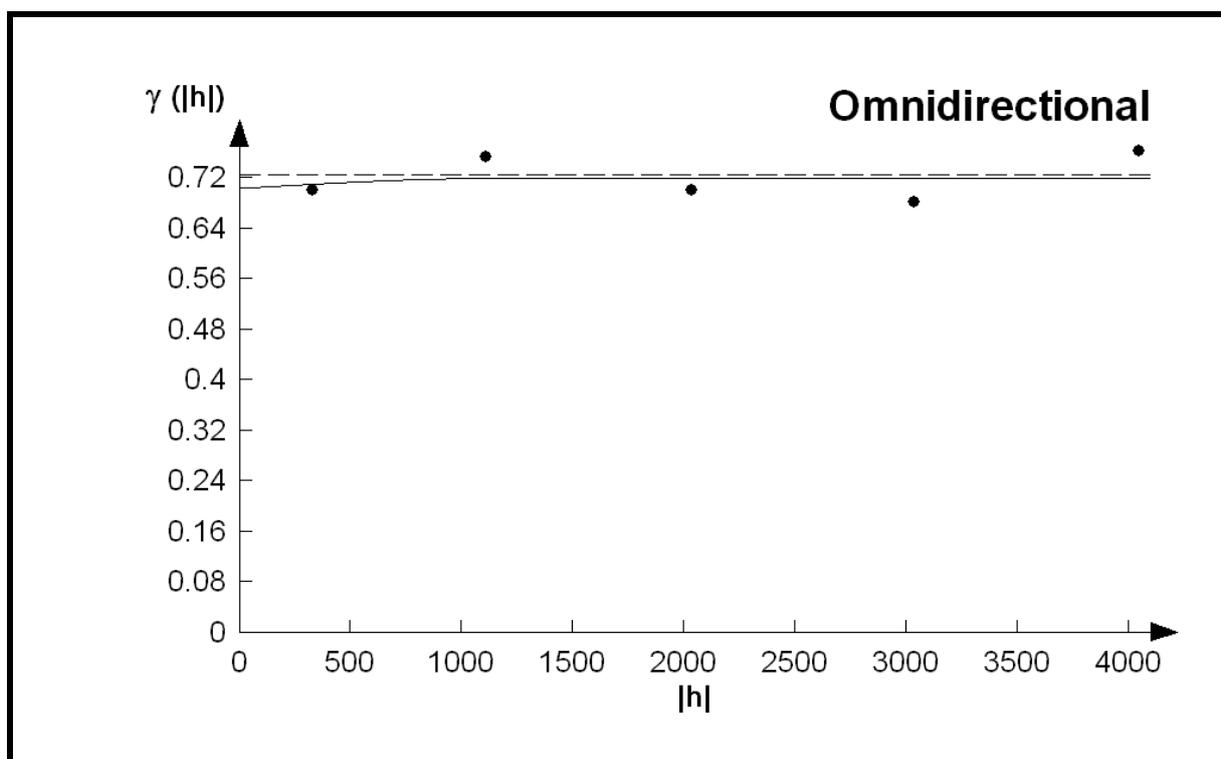


**Figure n°47 :** Variogramme surfacique de total BTEX totaux

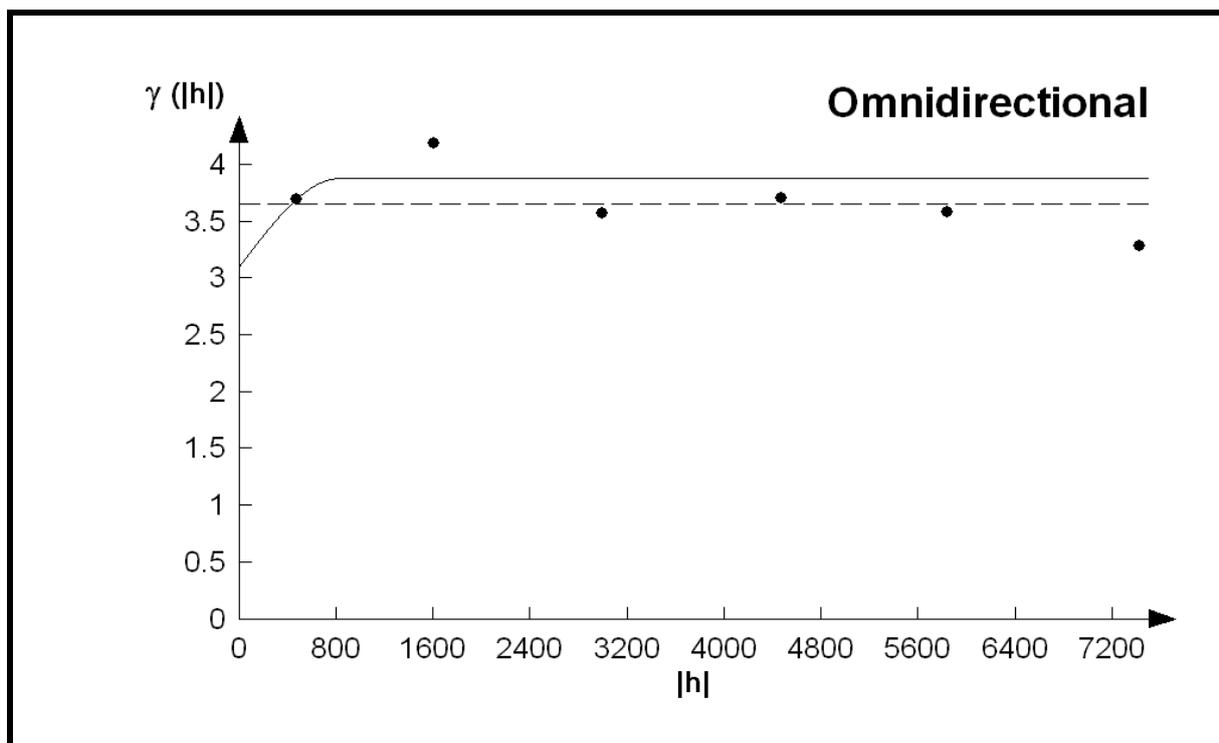
Les différents variogrammes expérimentaux du benzène, toluène et total BTEX sont présentés dans les figures n°48, 49 et 50 (les variogrammes selon la saison sont présentés dans l'annexe n°04). Rappelons que  $\gamma (|h|)$  représente la fonction variogramme et  $|h|$  est le vecteur distance.



**Figure n°48 :** Variogramme expérimental de benzène moyen



**Figure n°49 :** Variogramme expérimental de toluène moyen



**Figure n°50 :** Variogramme expérimental des BTEX totaux

Il est à signaler que ces paramètres d'ajustements du variogramme seront pris en considération lors de l'estimation par krigeage ordinaire. Le tableau n°21 regroupe ces différents paramètres d'ajustements (les paramètres d'ajustements des variogrammes selon la saison sont présentés dans l'annexe n°05).

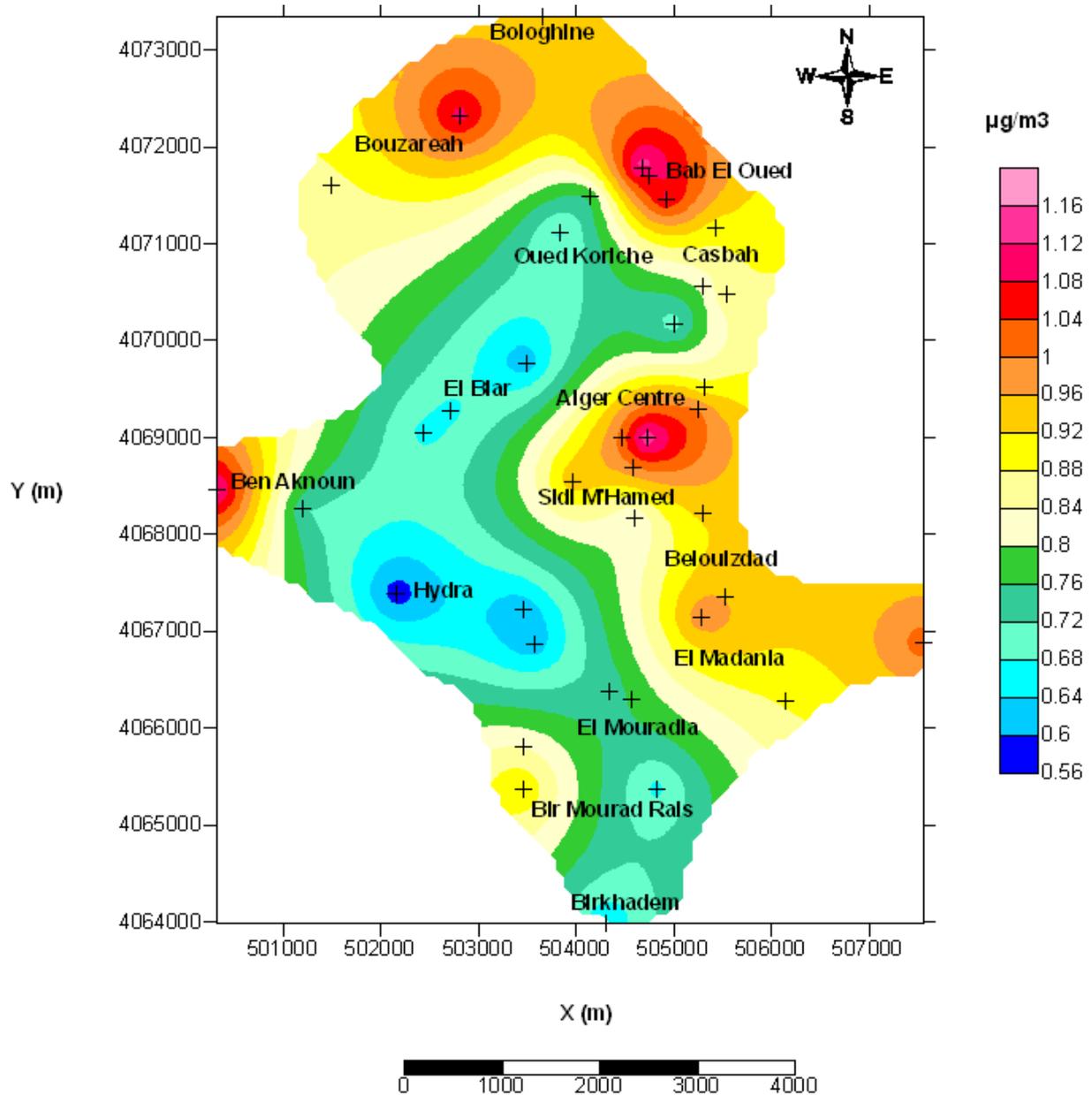
**Tableau 21 :** Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux

<b>BTEX</b>	<b>Effet de pépité</b>	<b>Palier</b>	<b>Portée</b>	<b>Modèle</b>
Benzène	0,138	735	0,032	Exponentiel
Toluène	0,704	1 148	0,016	Sphérique
BTEX totaux	3,108	825	0,777	Sphérique

Une cartographie de la pollution a été réalisée pour le benzène, toluène et BTEX totaux par saison et annuelle. Les autres polluants (éthylbenzène et les xylènes) ne seront pas pris en considération à cause de leurs faibles teneurs.

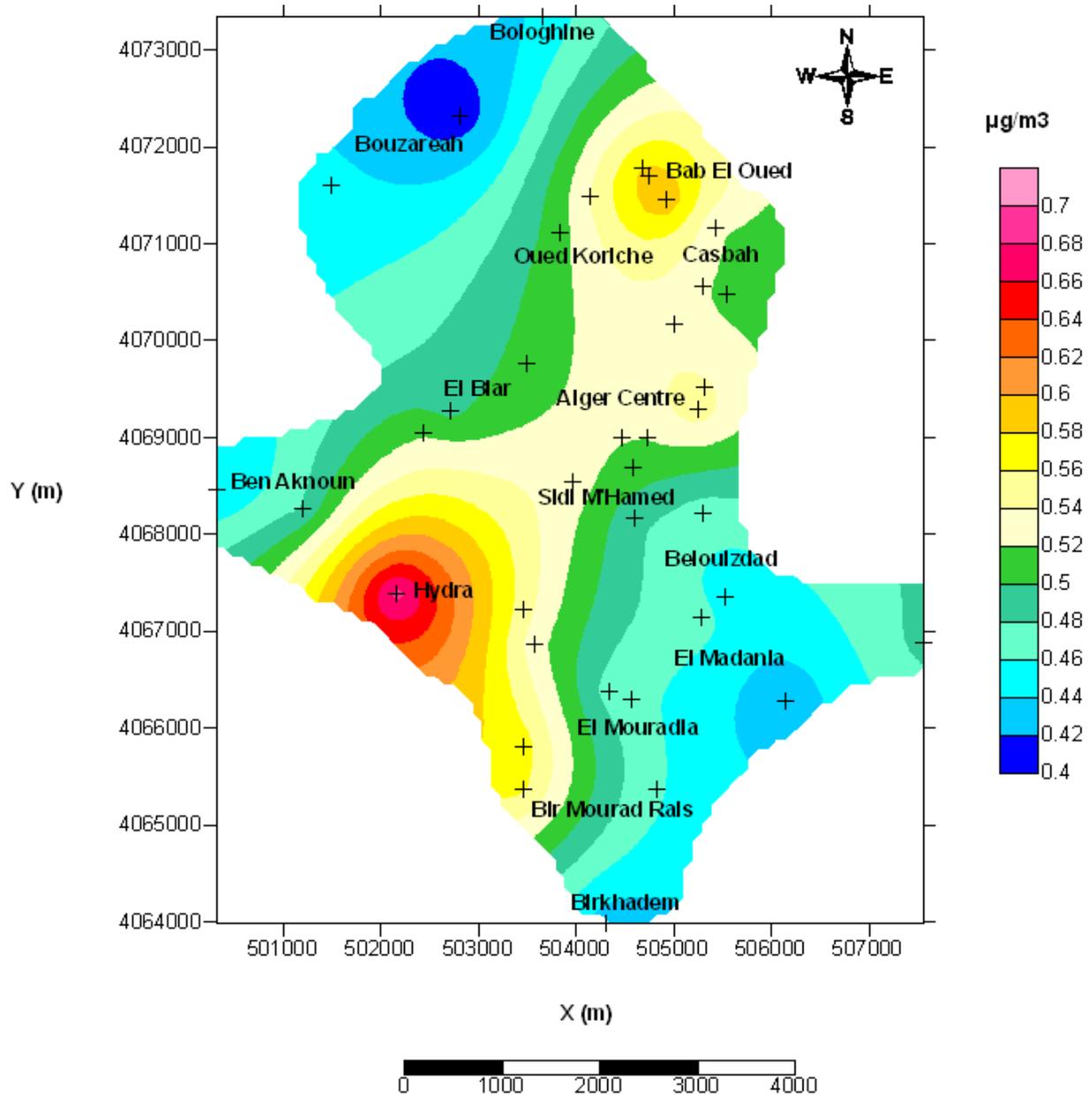
Le logiciel utilisé pour la réalisation de ces cartes est le Surfer 8 en utilisant le krigeage ordinaire et en introduisant les données obtenues par les variogrammes expérimentaux (effet de pépité, palier et portée). Ces cartes sont présentées en figure n°51 à 59.

Sur les cartes, x et y représentent les coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator). Les postes de mesures sont présentés par le symbole +.



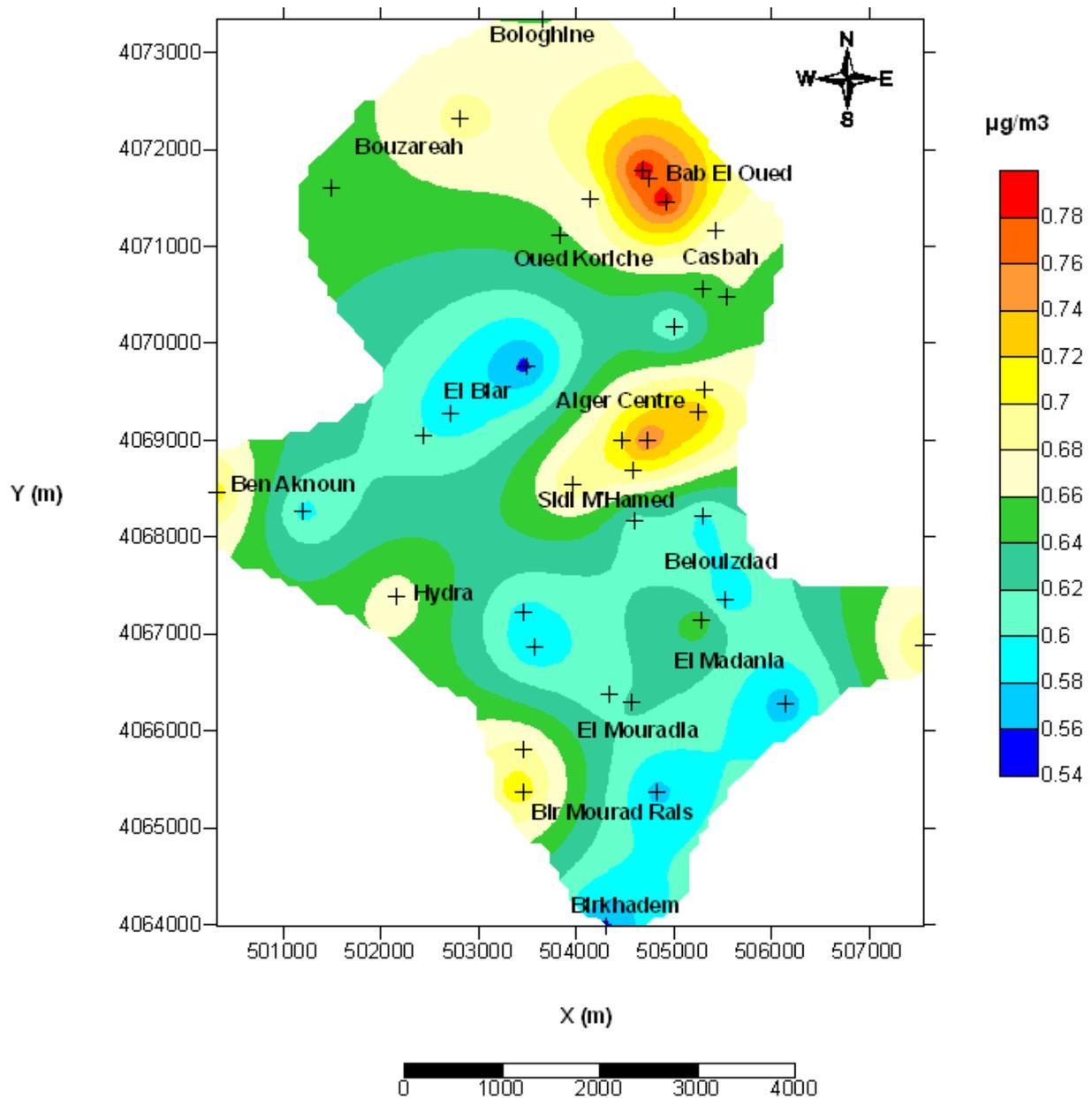
**Figure n°51 :** Carte de distribution du benzène (été)

On remarque que la pollution par le benzène pendant la période estivale est concentrée surtout au Nord et au Nord –Est de la carte. Les communes les plus touchées par cette pollution sont Bab El Oued, Alger Centre, Ben Aknoun et Bouzareah. Les communes de Hydra, El Biar et Birkhadem sont les moins polluées par le benzène.



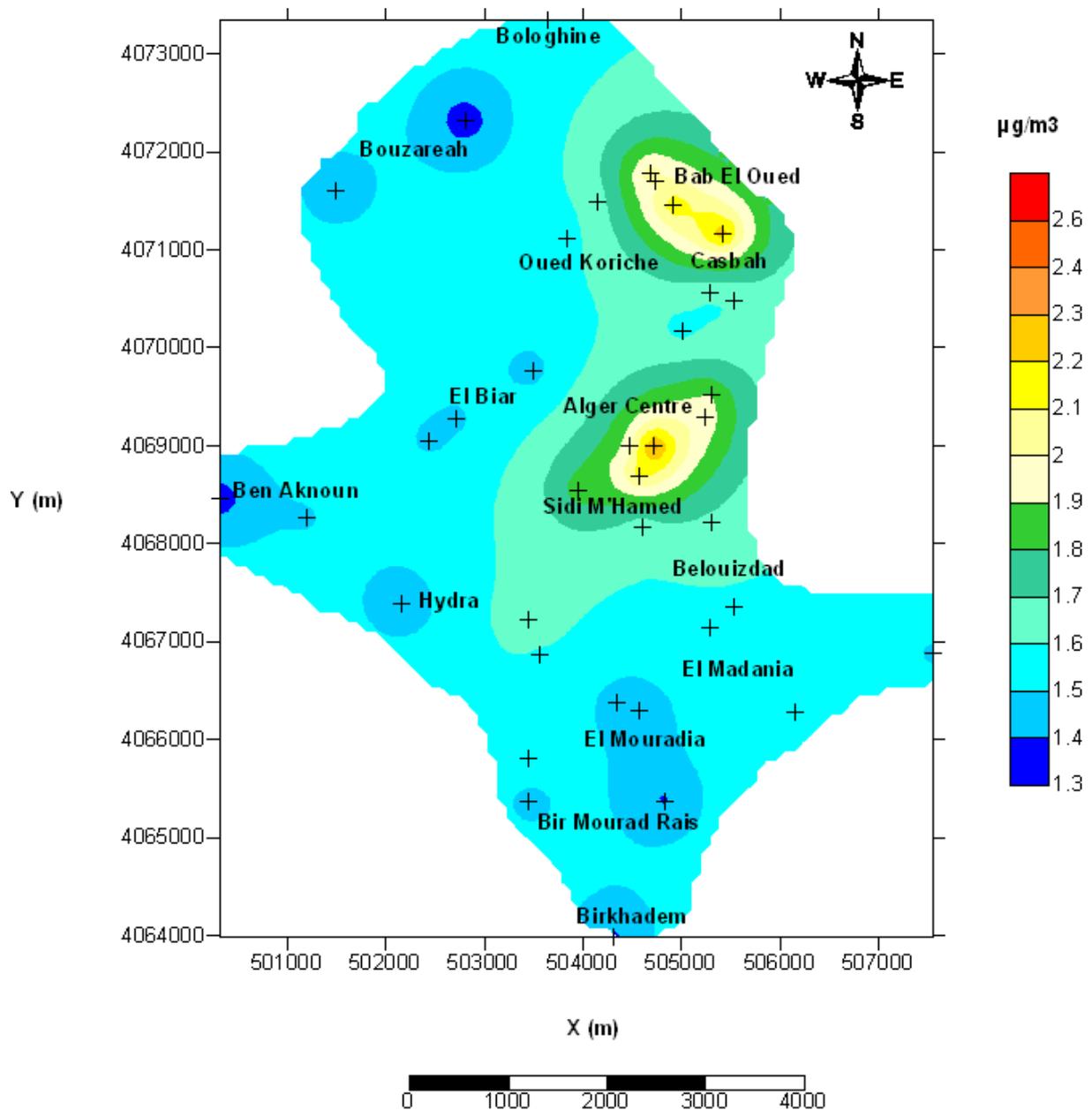
**Figure n°52 : Carte de distribution benzène (hiver)**

D'après la figure n°52, la commune de Hydra est la plus polluée pendant cette saison. Bab El Oued et Alger Centre connaissent aussi de fortes concentrations en benzène par rapport aux autres communes. Contrairement à la période estivale, où elle a connu de fortes concentrations, la commune de Bouzareah est devenue la commune la moins touchée par la pollution en benzène.



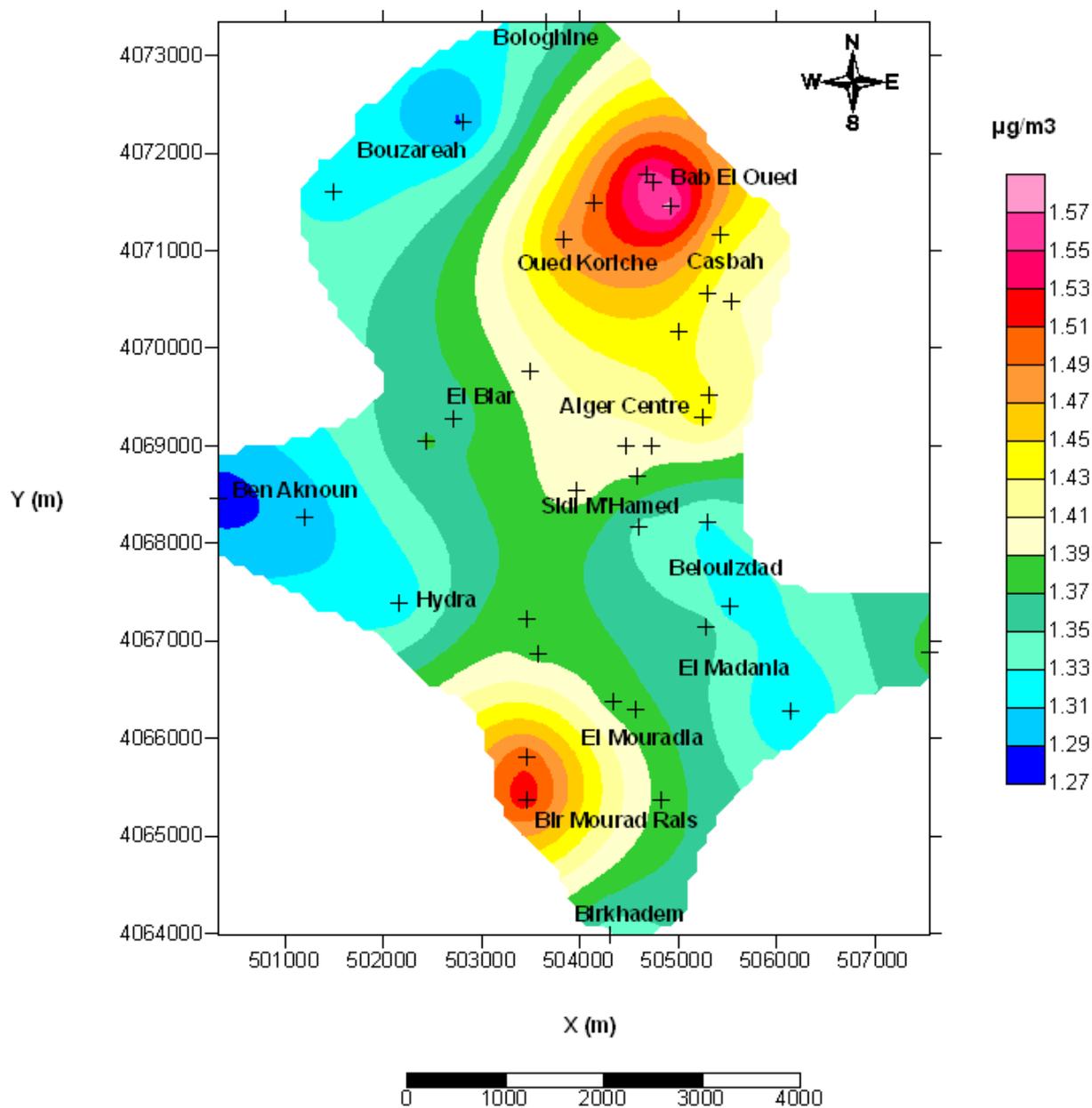
**Figure n°53 :** Carte de distribution benzène (annuelle)

La carte annuelle de la distribution de benzène montre que les communes de Bab El Oued, Alger Centre et Bir Mourad Rais sont les plus touchées par la pollution. La commune de Birkhadem est toujours classée parmi les communes les moins polluées.



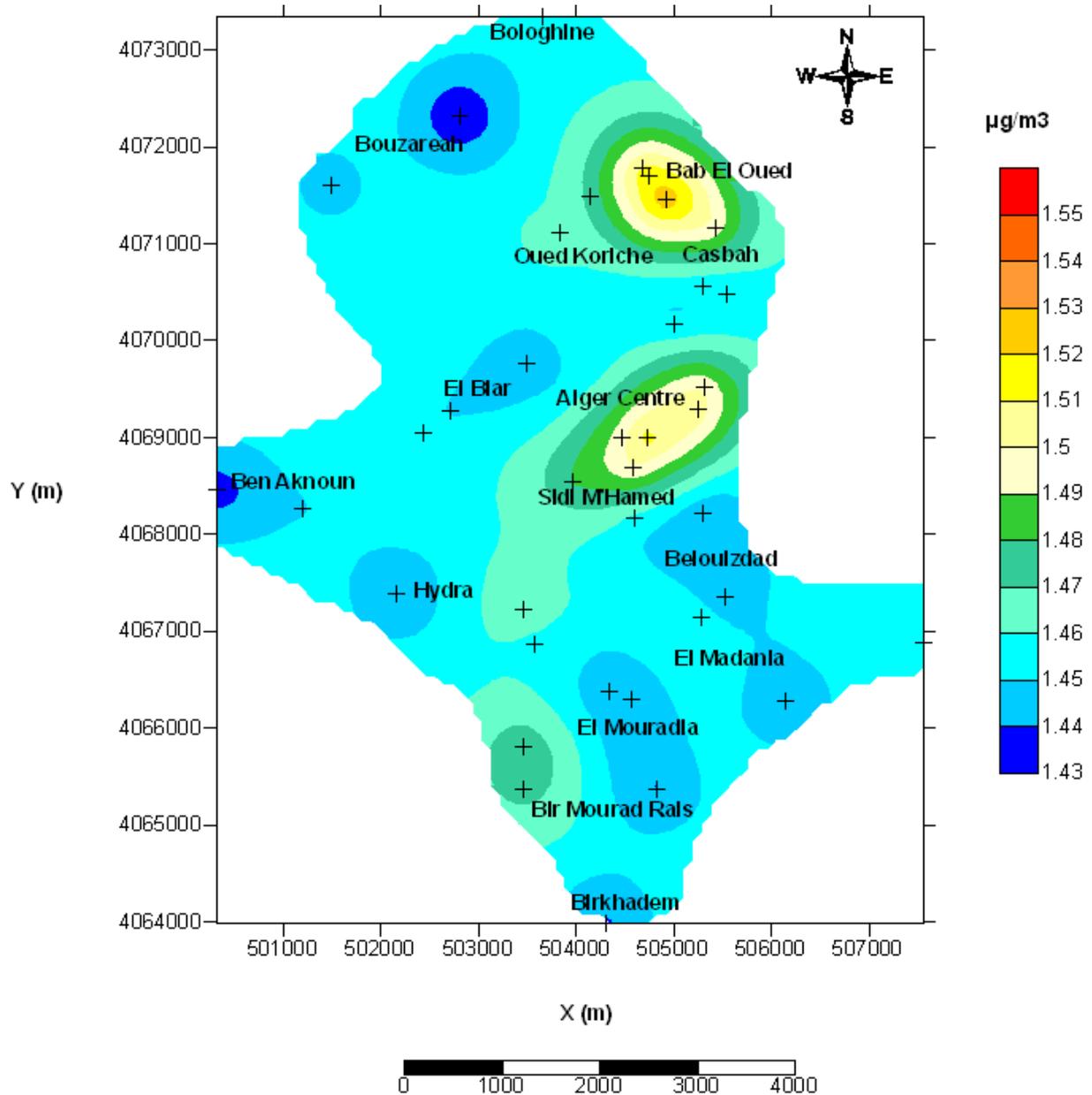
**Figure n°54 : Carte de distribution toluène (été)**

La pollution par le toluène est concentrée surtout dans les communes de Bab El Oued et Alger Centre. La plus part des autres communes ont des teneurs en toluène plus faibles.



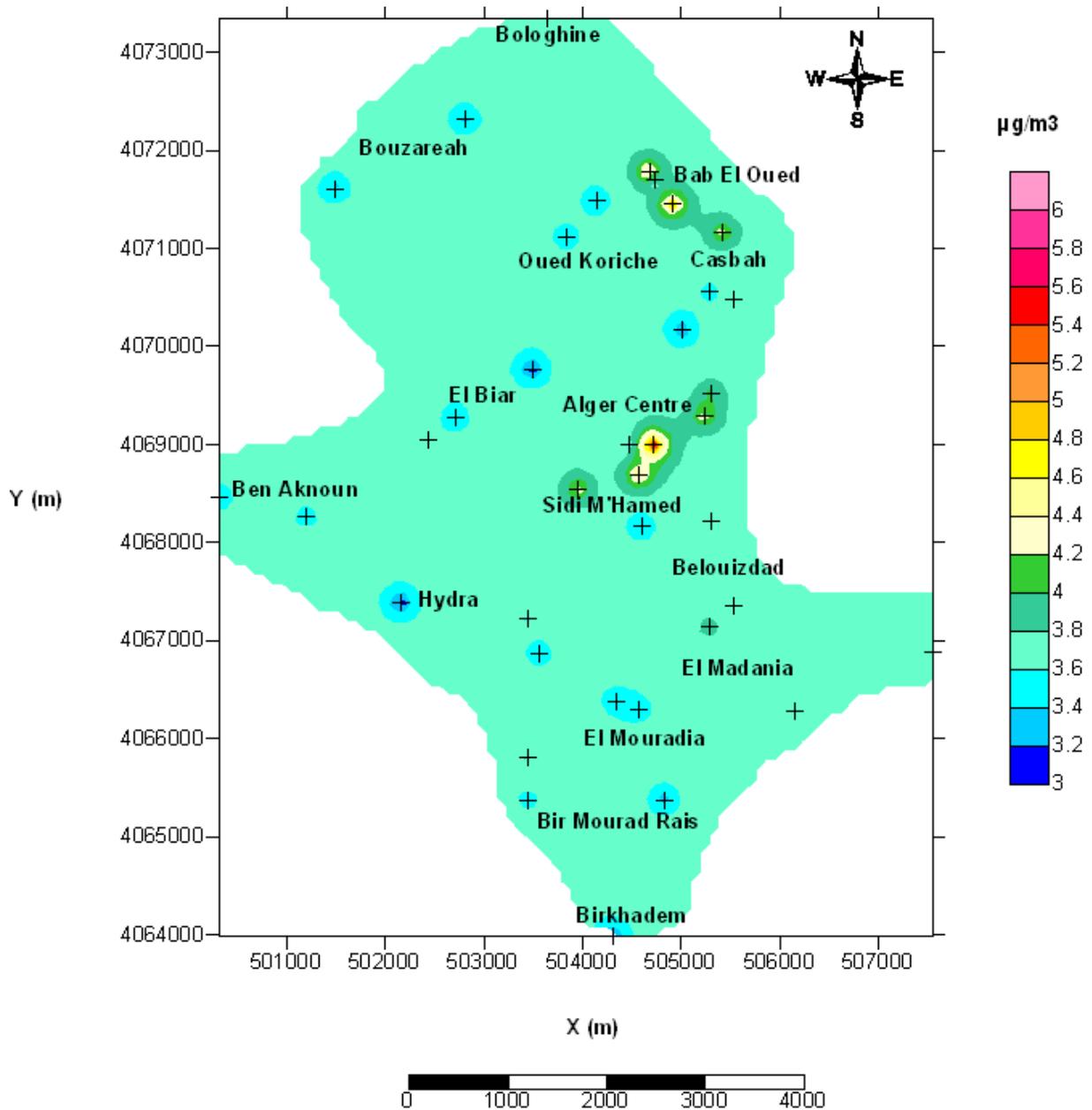
**Figure n°55 : Carte de distribution toluène (hiver)**

Pendant cette saison, les grandes teneurs en toluène sont toujours observées à Bab El Oued et à un degré moins à Alger Centre, mais en remarque que des fortes teneurs caractérisent la commune de Bir Mourad Rais. Contrairement à la période estivale, la commune de Bir Mourad Rais est classée parmi les communes les moins polluées en toluène tels que Ben Aknoun, Bouzareah et Birkhadem.



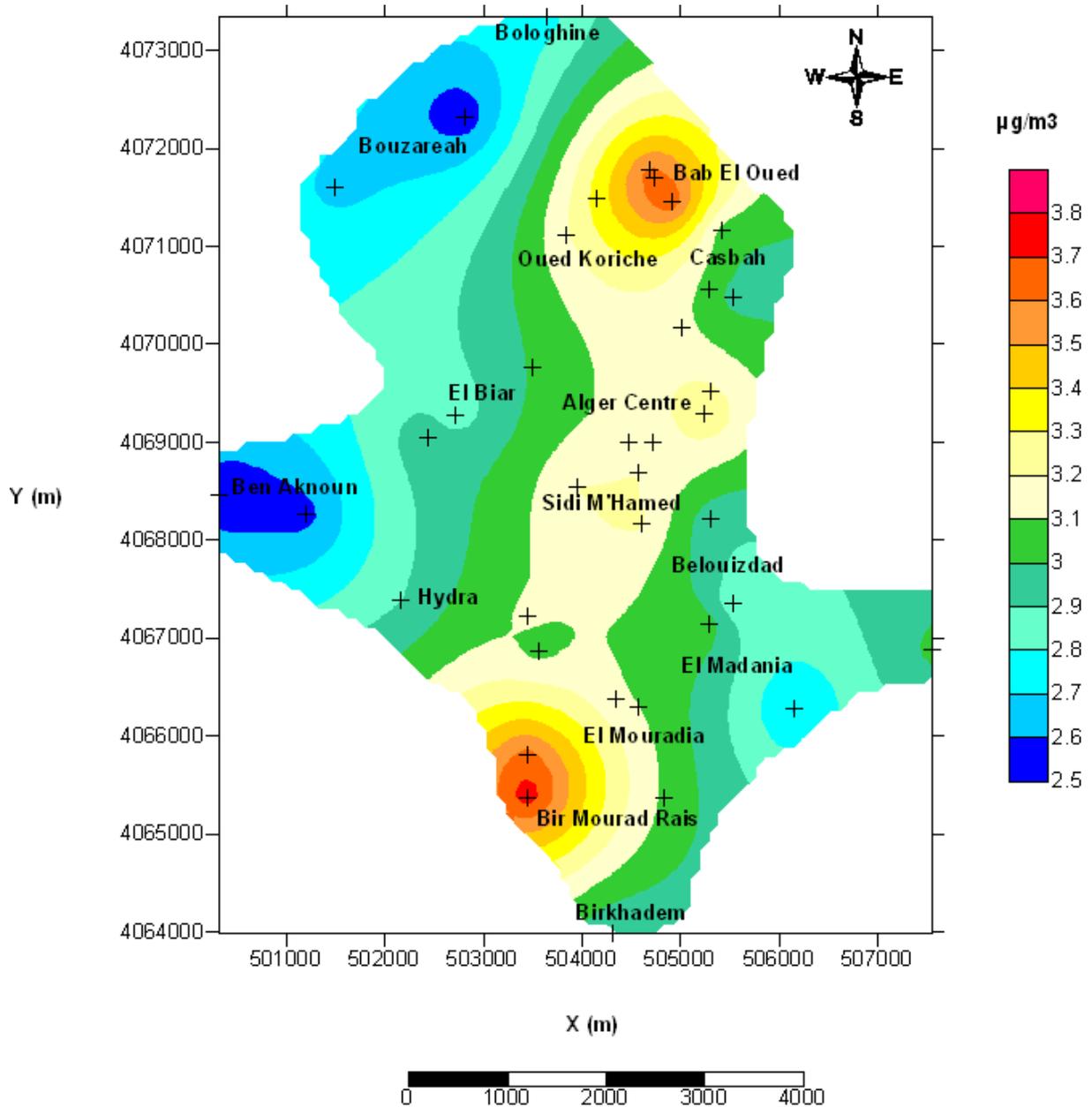
**Figure n°56 : Carte de distribution toluène (annuelle)**

La figure n°56 montre que les communes de Bab El Oued et Alger Centre sont les communes les plus atteintes par la pollution en toluène. La plupart des autres communes sont moins touchées par cette pollution.



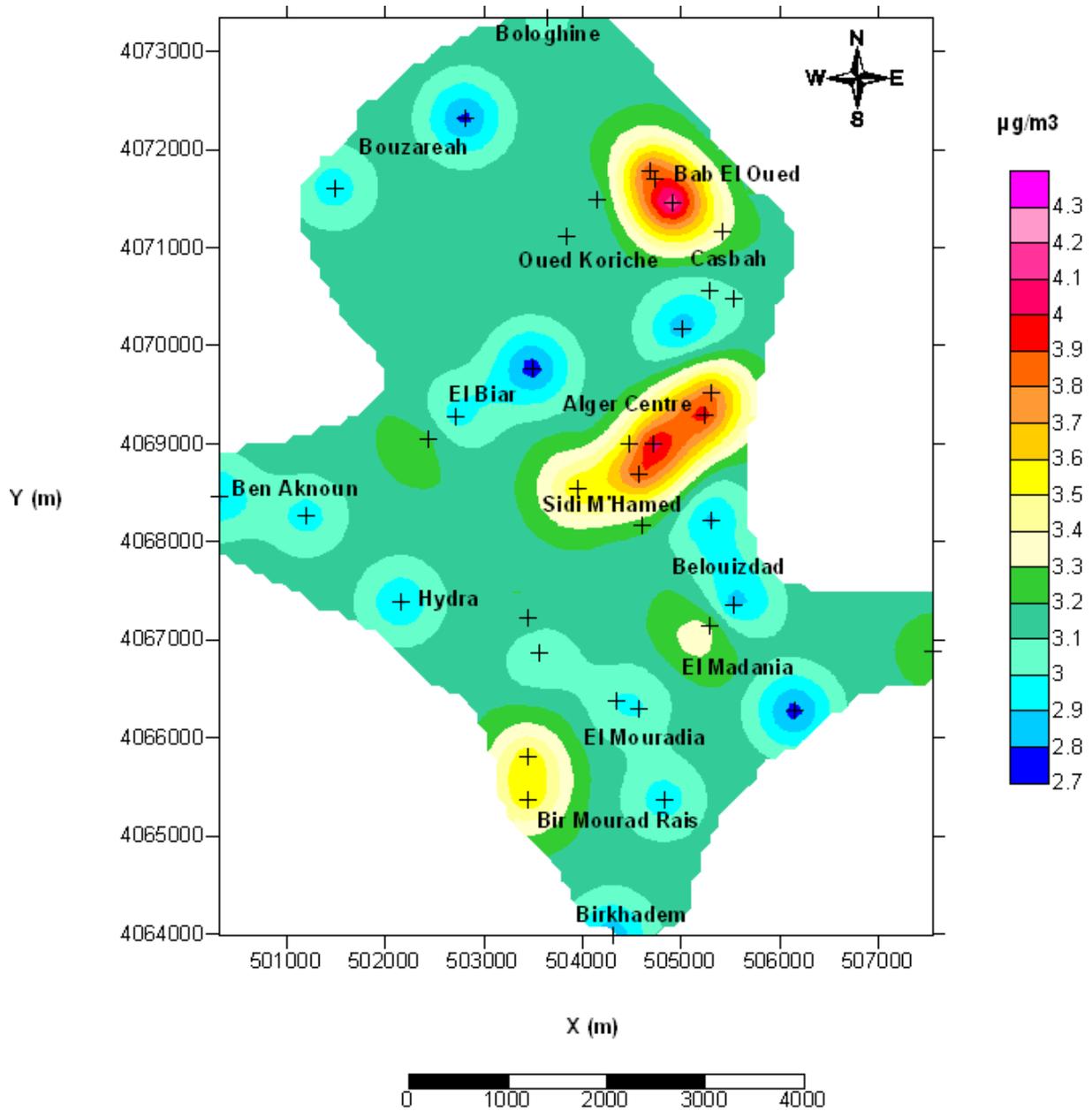
**Figure n°57:** Carte de distribution BTEX totaux (été)

La carte de distribution des BTEX totaux pendant la période estivale, nous permet de classer les communes de Bab El Oued, Casbah et Alger Centre comme étant les plus polluées. Les autres communes ont presque la même distribution de pollution qui est loin des fortes concentrations enregistrées dans les communes précédentes.



**Figure n°58 :** Carte de distribution BTEX totaux (hiver)

D'après la figure n°58, on remarque que les communes qui se trouvent sur l'axe Bab El Oued-Bir Morad Rais sont les plus atteintes par la pollution en BTEX totaux. Les maximum sont remarqués dans les bornes de cet axe c'est à dire Bab El Oued et Bir Mourad Rais.



**Figure n°59** : Carte de distribution BTEX totaux (annuelle)

La figure n°59 nous montre clairement que les communes de Bab El Oued, Alger Centre et Bir Mourad Rais sont les plus polluées. Bouzareah, Ben Aknoun et Birkhadem restent toujours les communes les moins atteintes par la pollution en BTEX totaux.

On remarque que la pollution par le benzène est concentrée au Nord et au Sud-Est de la carte. Le Nord d'Alger est connue par une grande densité de population habitant en majorité des quartiers populaires. Les axes routiers de ces quartiers connaissent un grand trafic routier. Le Sud-Est de la zone d'étude est connu comme étant une des portes d'Alger où règne quotidiennement un grand trafic routier.

En ce qui concerne les BTEX totaux, on remarque presque la même distribution de pollution que le benzène.

On constate que les régions qui connaissent un grand trafic routier et dont les conditions ne favorisent pas une bonne dispersion des BTEX sont les plus polluées. La pollution diminue en fonction de la distance de la source de pollution (par exemple Bab El Oued et Bologhine).

Sur toutes les cartographies, on relève que la pollution prédomine à Bab El Oued, à Alger Centre et à un degré moins dans les quartiers de Bir Mourad Rais. Ces en ces zones que la population résidente ou de passage sera la plus exposée la pollution par les BTEX. La distribution spatiale illustrée en figure n°58 indique clairement ce couloir nord-sud d'Alger où les BTEX atteignent les niveaux le plus élevées. Ces zones reçoivent sous l'influence du vent dominant (rose des vents en figure n°22) certainement les émissions du trafic routier qui longe L'est et le Centre de la baie d'Alger. Dans ce couloir, une surveillance continue des BTEX doit être mise en place.

## V.6 Comparaison des niveaux de pollution aux normes et situation par rapport à d'autres villes

En absence de normes algériennes régissant les BTEX, on va se référer à la réglementation française et européenne [31], qui fixe pour le benzène  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (moyenne annuelle) comme seuil limite à ne pas dépasser et  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (moyenne annuelle) comme objectif de qualité. Par rapport à ces normes, on notera qu'à Alger, il n'y a eu en aucun site et en aucune commune, de dépassement. La teneur en benzène reste en moyenne inférieure à  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et donc loin en dessous du seuil de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ainsi, la pollution par les BTEX à Alger n'atteint pas des seuils inquiétants. On peut certes mesurer des teneurs élevées (par exemple durant les heures de pointe) mais observé sur une longue période, on constate que la population urbaine résidente n'est pas exposée à une pollution excessive par les BTEX.

Les résultats obtenus dans cette zone sont par ailleurs similaires à ceux obtenues dans une étude menée dans plusieurs communes dans l'Est d'Alger [68].

Une comparaison des teneurs mesurées à Alger durant notre étude avec celles observées dans certaines grandes villes, montre également que l'agglomération d'Alger n'accuse pas un niveau élevé en BTEX.

**Tableau n°22** : Teneurs des BTEX enregistrés dans quelques villes de monde en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Ville	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m+p-Xylène	o-Xylène	Rapport Tol/Ben	Références
<b>Rome (Italie)</b>	35,50	99,70	17,60	54,60	25,10	2,81	[54]
<b>Sao Paulo (Brésil)</b>	4,80	45,10	15,60	30,70	7,80	9,40	[69]
<b>Santiago (Chili)</b>	14,80	29,80	6,50	25,20	8,90	2,01	[55]
<b>Yokohama (Japon)</b>	1,7-3,7	4,7-34,30	0,5-3,8	1,0-2,0	0,1-0,8	-	[70]
<b>London (Angleterre)</b>	2,70	7,20	1,40	3,70	1,50	2,67	[56]
<b>Rio de Janeiro (Brésil)</b>	1,10	4,80	3,60	10,40	3,00	4,36	[71]
<b>Hambourg (Allemagne)</b>	1,40	4,70	nd	0,88	nd	3,36	[57]
<b>Hanovre (Allemagne)</b>	4,27	24,00	2,99	7,64	2,82	5,62	[72]
<b>Seoul (Corée du Sud)</b>	5,10	48,20	7,80	16,00	6,50	9,45	[73]
<b>Hong-Kong (Chine)</b>	4,85	28,80	3,11	3,98	2,98	5,94	[74]

Ville	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m+p-Xylène	o-Xylène	Rapport Tol/Ben	Références
<b>Caire (Egypte)</b>	87,45	214,52	42,25	140,44	72,38	2,45	[58]
<b>13 sites dans des états U.S.A</b>	0,8-3,6	1,5-10,5	0,60-2,4	1,8-5,2	0,6-1,9	-	[75]
<b>Toronto (Canada)</b>	0,8-2,3	-	-	-	-	-	[76]
<b>Nice (France)</b>	3,00	21,00	-	21,90		7,00	[77]
<b>Delhi (Inde)</b>	48	85	7	30	15	1,77	[61]
<b>Alger Est</b>	2,28	2,35	0,76	1,02	0,32	0,96	[68]
<b>Alger Centre</b>	0,65	1,45	0,23	0,72	0,16	2,91	Présente étude

On retrouve dans cette comparaison l'ampleur de la pollution dans les villes comme Delhi et le Caire, villes connues comme étant parmi les plus polluées du monde.

## V.7. Exploitation Google Earth

En vu d'avoir une base de données sur l'ensemble des teneurs des BTEX et visualiser rapidement ces données, nous avons effectué un traitement sur logiciel Google Earth basé sur le système d'info géographique qui donne une lecture optimale et rapide d'une base de données. Les données sont introduites de la manière suivante :

- Effectuer un zoom avant pour mieux voir le lieu voulu ;
- Cliquez sur l'icône de repère  dans le menu de la barre d'outils, en haut de l'écran;
- Introduire les paramètres de pollution dans cette boîte de dialogue ;
- Enregistrer.

Les paramètres à introduire sont : la référence du site, la concentration en benzène, la concentration en toluène, la concentration en éthylbenzène, la concentration en m+p xylène et la concentration en o-xylène.

La figure n°60 présente un exemple d'un site de proximité automobile, avec ces concentrations en BTEX enregistrées pendant les deux campagnes. En cliquant sur le repère P1 une boîte de dialogue s'affiche contenant la base de données de la pollution par les BTEX de ce site.



**Figure n°60:** Exemple de visualisation des paramètres de pollutions en un site de proximité automobile

## VI. CONCLUSION

Dans cette présente étude, nous nous sommes intéressées à l'évaluation et la distribution des BTEX sur la zone Centre et Ouest d'Alger. L'échantillonnage a été effectué à l'aide des échantillonneurs passifs Radiello. Cet échantillonnage a permis de suivre 38 sites répartis sur quinze communes d'Alger.

Pour appréhender l'exposition à la pollution de la population résidente et de passage, nous avons étudié aussi bien des sites urbains de fond que des sites de type station trafic.

Deux campagnes d'échantillonnage (estivale et hivernale) ont été réalisées afin d'étudier l'effet saisonnier sur la dispersion et la réactivité chimique des polluants.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs enregistrées dans les sites de proximité automobile sont plus grands que celles des sites de fonds. Le rapport entre les deux dépend de la réactivité de BTEX.

Les teneurs estivales en BTEX sont plus élevées que les teneurs hivernales, sauf pour l'éthylbenzène. Cette différence est due probablement à l'évaporation et à l'existence d'autres sources d'émissions des BTEX pendant l'été.

Globalement, le trafic routier et l'évaporation des carburants constituent les sources d'émissions dominantes.

La comparaison avec les normes internationales montrent que le niveau de pollution par les BTEX n'est pas alarmant et ne dépasse pas les objectifs de qualité pour la plus part des sites.

Ce travail nous a permis surtout de nous initier à la géostatistique et de l'appliquer aux études environnementales. C'est ainsi que pour la première fois en Algérie, une cartographie de la pollution de l'air a été réalisée.

La cartographie de la distribution de la pollution par les BTEX a été réalisée à l'aide de deux logiciels : Variowin et Surfer 8. Cette cartographie nous a permis de constater que la région de Bab El Oued du centre et de l'est d'Alger sont les plus atteintes par la pollution par les BTEX, et ce quelque soit la saison.

Cette étude constitue par ailleurs une base intéressante pour le choix des sites les plus intéressants à surveiller en continu, c'est-à-dire à y installer des stations de surveillance.

Enfin, l'échantillonnage passif avec tubes diffusifs radiaux est une méthode qui présente beaucoup d'avantages, en sens qu'on peut mener des identifications sur de larges zones avec une logistique et un coût assez réduits. Pour cerner la pollution dans toute l'agglomération urbaine d'Alger et aboutir à une cartographie plus précise, il est recommandé d'élargir la zone d'étude, d'augmenter les sites de mesure (maillage plus serrée) et de comparer les teneurs urbaines avec celles du milieu naturel rural.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- 1- Kerbachi R., Boughedaoui M., Bounoua L. and Keddou M., Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers. *Atmospheric Environment*, 40, 2006, pp 3995-4003
- 2- Martins E.M., Arbilla G., Bauerfeldt G.F. and De Paula M., Atmospheric levels of aldehydes and BTEX and their relationship with vehicular fleet changes in Rio de Janeiro urban area. *Chemosphere*, 67, 2007, pp 2096-2103
- 3- Skov H., Hansen A.B., Lorenzen G., Andersen H.V., Løfstrøm P. and Christensen C.S. Benzene exposure and the effect of traffic pollution in Copenhagen, Denmark. *Atmospheric Environment*, 35, 2001, pp 2463-2471
- 4- Schnatter A.R., Rosamilia K. and Wojcik N.C. Review of the literature on benzene exposure and leukemia subtypes, *Chemico-Biological Interactions*, 153-154, 2005, pp 9-21
- 5- Lee C.W., Dai Y.T., Chien C.H and Hsu D.J. Characteristics and health impacts of volatile organic compounds in photocopy centers, *Environmental Research*, 100, 2006, pp 139-149
- 6- Swaen G.M.H., Scheffers T., De Cock J., Slangen J. and Drooge H. Leukemia risk in Caprolactam workers exposed to benzene. *Ann Epidemiol*, 15, 2005, pp 21-28
- 7- Toro M.V., Cremades L.V. and Calbo J. Relationship between VOC and NOx emissions and chemical production of tropospheric ozone in the Aburra Valley (Colombia). *Chemosphere*, 65, 2006, pp 881-888
- 8- Office Nationale des statistiques. Parc national automobile quelques chiffres au 31/12/2005, *Données Statistiques*, n°451, 2006
- 9- Journal le Phare, n°82, Février 2006, Mensuel, Algérie
- 10- Sportisse B., *Pollution atmosphérique : des processus à la modélisation*, Springer, 2008
- 11- Delmas R., Mégie G et Peuch V.H., *Physique et chimie de l'atmosphère*, Belin, 2005
- 12- Dertie J.P., *la pollution atmosphérique*, Dunod, 1989

- 13- Journal Officiel de la Communauté Européenne du 16 juillet 1984, Directive du Conseil n° 84/360/CEE du 28 juin 1984 relative à la lutte contre la pollution atmosphérique en provenance des installations industrielles.
- 14- Journal Officiel de la République Algérienne n°43, Décret n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable
- 15- Le Cloirec P., COV (composés organiques volatils), Technique d'ingénieur, G1 835, 2007
- 16- INERIS. Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) dans l'air, sources, mesures et concentrations, rapport d'étude N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1056-IZD
- 17- INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Benzène, INERIS-DRC-01-25590-00DR256.doc, Version N°3, Mars 2006
- 18- Meybeck M., Blet E., Barret P et Della Massa.J.E., Etude de l'exposition en hydrocarbures (type BTEX) lors du remplissage du réservoir d'un véhicule. Pollution Atmosphérique, 191, Juillet-Septembre 2006, pp 337-345
- 19- Hinwood A.L., Berko H.N., Farrar D., Galbally I.E., Weeks I.A., Volatile organic compounds in selected micro-environments, Chemosphere, 63, 2006, pp 421-429
- 20- Viala A ., Botta A., Toxicologie, Lavoisier Edition, 2005
- 21- Schnatter A.R., Rosamli K., Wojcik N.C., Review of the literature on benzene exposure and leukemia subtypes, Chemico-Biological Interactions, 153-154, 2005, pp 9-21
- 22- Vaughan AT., Betti C.J., Villalobos M.J., Premkumar K., Cline E., Jiang Q., Diaz M.O., Surviving apoptosis : A possible mechanism of benzene-induced leukemia, Chemico-Biological Interactions, 153-154, 2005, pp 179-185
- 23- Glass D.C., Gray C.N., Jolley D.J., Gibbons C., Sim M.R., Health Watch exposure estimates : Do they underestimate benzene exposure ?, Chemico-Biological Interactions, 153-154, 2005, pp 23-32

- 24- Lee C.W., Dai Y.T., Chien C.H., Hsu D.J., Characteristics and health impacts of volatile organic compounds in photocopy centers, *Environmental research*, 100, 2006, pp 139-149
- 25- Badham H.J., Winn L.M., Investigating the role of the aryl hydrocarbon receptor in benzene-initiated toxicity in vitro, *Toxicology*, 229, 2007, 177-185
- 26- Swaen G.M.H., Scheffers T., De Cock J., Slangen J., Drooge H., Leukemia risk in Caprolactam workers exposed to benzene, *Ann Epidemiol*, 15, 2005, pp 21-28
- 27- IARC, International Agency for Research on Cancer, IARC monographs on the evolution of the carcinogenic risk of chemicals to humans, benzene, IARC, Lyon, 1982
- 28- United States Environmental Protection Agency Office of Drinking Water Health Advisories, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, volume 106, Springer-Verlag Edition, , New York, 1988
- 29- [http://www.euro.who.int/air/activities/20050223\\_4](http://www.euro.who.int/air/activities/20050223_4)
- 30- Bliefert C., Perraud R., *Chimie de l'environnement Air, Eau, Sols, Déchets*, De Boeck Université, 2001
- 31- Directive 2008/50/CE du parlement européen et du conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe, *Journal Officiel de l'Union Européenne* N°L152, 11 juin 2008
- 32- Décret n°06-02 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, *Journal Officiel de la République Algérienne* N°1, 8 janvier 2006, pp 3-4
- 33- Echeverria D., Fine L., Langolf G., Schork A., Sampaio C., Acute neurobehavioural effects of toluene, *Br J Ind Med*, 46 (6), 1989, pp 483-495
- 34- Deraisme J., Bobbia M., L'apport de la géostatique à l'étude des risques liés à la pollution atmosphérique, *Environnement, Risques & Santé.*, Vol. 2, n° 3, mai-juin 2003

- 35- Chauret P., Aide mémoire de géostatistique linéaire, Mine Paris, Paris tech Les presses, 2008
- 36- WALTER C., Cours de géostatistique, ENSA – INRA Rennes, 2002
- 37- DOUAOUI A., Variabilité spatiale de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chéiff. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse de Doctorat d'état, INA – Alger, 2005
- 38- Gascuel O.C., Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, Thèse de Doctorat, ENSM Fontainebleu & ENSA- INRA Rennes, 1984
- 39- AUBRY Ph., Traitement des variables régionalisées en écologie, Apports de géomantique et de la géostatistique, Thèse de doctorat, Université Claude BERNARD – Lyon, 2000
- 40- Journel A.G., Géostatistique minière, Centre de géostatistique, Ecole des mines, Fontainebleu, 1977
- 41- Wackernagel H., Cours de géostatistique multiparamétrique, Publication C-146, 1993
- 42- MATERON G., Les variables régionalisées et leurs estimations, Masson, Paris, 1965
- 43- DOUAOUI A., Variabilité spatiale de quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Chéiff, incidences cartographique. Thèse de Magistère., INA Alger, 1993
- 44- Delhomme J.P., Application de la théorie de la variable régionalisée dans la science de l'eau, Thèse de doctorat, ENSAM de Paris, 1976
- 45- Voltz M., Variabilité spatiale des propriétés physique en milieu alluvial : essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques, Thèse de Doctorat, *ENSAM*, 1986

- 46- Webster R., Quantitative spatial analysis of soil in the field in advecens. Soil Science Vol3, sparinger-verlag New York inc, 1985
- 47- Walter C., Estimation des propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : Cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Île et vilaine (France), Thèse Doctorat de l'Université de Paris VI, 1990
- 48- <http://www.radiollo.com>
- 49- Pennequin-Cardinal A., Plaisance H., Locoge N., Ramalho O., Kirchner S. et Galloo J.C., Performances of the Radiello<sup>®</sup> diffusive for BTEX measurements : Influence of environmental conditions and determination of modelled sampling rates, Atmospheric Environment, 39, 2005, pp 2535-2544
- 50- Bruno P., Caputi M., Caselli M., de Gennaro. et de Rienzo M., Reliability of a BTEX radial diffusive sampler for thermal desorption : field measurements, Atmospheric Environment, 39, 2005, pp 1347-1355
- 51- Dependence on sampling rates of Radiello<sup>®</sup> diffusion sampler for BTEX measurements with the concentration level and exposure time, Talanta, 65, 2005, pp 1233-1240
- 52- DPAT Alger, Annuaire statistique de la wilaya d'Alger année 2005
- 53- Carte hydrogéologique de la région d'Alger, Secretariat d'état à l'hydraulique, 1973, Algérie
- 54- Brocco D., Fratarcangeli R., Lepore L., Petricca M. et Ventrone I., Determination of aromatic hydrocarbons in urbain air of Rome, Atmospheric Environment, 30, 1996, pp 557-566
- 55- Hsieh L.T., Yang H.H. et Chen H.W., Ambient BTEX in the neighborhoods of different industrial parks in Southern Taiwan, Journal of hazardous Materials, A128, 2006, pp 106-115
- 56- Monod A., Sive B.C., Avino P., Chen T., Blake D.R. et Rowland F.S., Monoaromatic compounds in ambient air of various cities: a focus on correlations between the xylenes and ethylbenzene, Atmospheric Environment, 35, 2001, pp 135-149

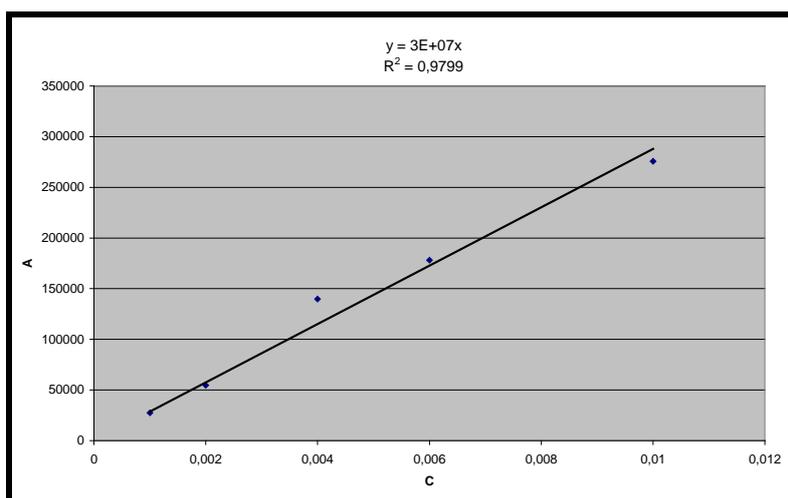
- 57- Schneider P., Gebefugi I., Richter K., Wolke G., Schnelle J., Wichmann H.E. et Heinrich J., Indoor and outdoor BTX levels in German cities, *Total Environment*, 267, 2001, pp 41-51
- 58- Khoder M.I., Ambient levels of volatile organic compounds in the atmosphere of Greater Cairo, *Atmospheric Environment*, 41, 2007, pp 554-566
- 59- Escourou G., *Transports contraintes climatiques et pollutions*, SEDES, 1996
- 60- Atkinson R., Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: A review, *Atmospheric Environment*, Vol 24.n°1, 1990, pp 1-41
- 61- Hoque R.R., Khillare P.S., Agarwal T., Shridhar V. et Balachandran S., Spatial and temporal variation of BTEX in the urban atmosphere of Delhi, India, *Science of the Total Environment*, 392, 2008, pp 30-40
- 62- Kwangsam N., Yong Pyo K., Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2001, pp 2603-2614
- 63- Chih-Chung C., Usha S., Yu-Sung L., Jiunn-Guang L., An examination of 7:00-9:00 PM ambient air volatile organics in different seasons of Kaohiung city, Southern Taiwan, *Atmospheric Environment*, 39, 2005, pp 867-884
- 64- Académie des Sciences –CASAS–, *Pollution atmosphérique due aux transports et santé publique*, Rapport commun n°12, Technique & Documentation, 1999
- 65- Keddam M., *Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les hydrocarbures aromatiques monocycliques à Alger*, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2002
- 66- Wathne B.M., Measurements of benzene, toluene and xylenes in urban air, *Atmospheric Environment*, 17(9), 1983, pp 1713-1722
- 67- Wang X., Sheng G., Fu J., Chan C., Lee S.C., Chan L.Y. et Wang Z., Urban roadside aromatic hydrocarbons in three cities of the Pearl River Delta, People's Republic of China, *Atmospheric Environment*, 36, 2002, pp 5141-5148

- 68- Aboun N., Etude par échantillonnage passif de la pollution de l'air par les BTEX à Alger Est, Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique – Alger, 2008
- 69- Colón M., Plei J.D., Hartlage T.A., Guardani M.L., Martins M.H., Survey of volatile organic compounds associated with automotive emissions in the urban airshed of Sao Paulo, Brazil, *Atmospheric Environment*, 35, 2001, 4017-4031
- 70- Yamamoto N., Okayasu H., Murayama S., Mori S., Hunahashi K. et Suzuki K., Measurement of volatile organic compounds in the urban atmosphere of Yokohama, Japan, by an automated gas chromatographic system, *Atmospheric Environment*, 34, 2000, pp 4441-4446
- 71- Martins E.M., Arbilla G., Bauerfeldt G.F. et De Paula M., Atmospheric levels of aldehydes and BTEX and their relationship with vehicular fleet changes in Rio de Janeiro urban area, *Chemosphere*, 67, 2007, pp 2096-2103
- 72- Ilgen E., Levsen K., Angerer J., Schneider P., Heinrich J. et Wichman H.E., Aromatic hydrocarbons in the Atmospheric Environment: Part I: personal monitoring, *Atmospheric Environment*, 35, 2001, pp 1265-1279
- 73- Na K., Kim Y.P. et Moon K.C., Diurnal characteristics of volatile organic compounds in the Seoul atmosphere, *Atmospheric Environment*, 37, 2003, pp 733-742
- 74- Ho K.F., Louie P.K.K. et Zou S.C., Seasonal variation of carbonyl compound concentrations in urban area of Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 36, 2002, pp 1259-1265
- 75- Pankow J.F., Luo W., Bender D.A., Isabelle L.M., Hollingsworth J.S., Chen C., Asher W.E. et Zogorski J.S, Concentrations and co-occurrence correlations of 88 volatile organic compounds (VOCs) in the ambient air of 13 semi-rural to urban locations in the United States, *Atmospheric Environment*, 37, 2003, pp 5023-5046
- 76- Germain A., Rousseau J. et Dann T., Problématique du Benzène dans l'Est de Montréal (Québec), Canada, *Pollution atmosphérique*, 185, Janvier-Mars 2005, pp 91-99

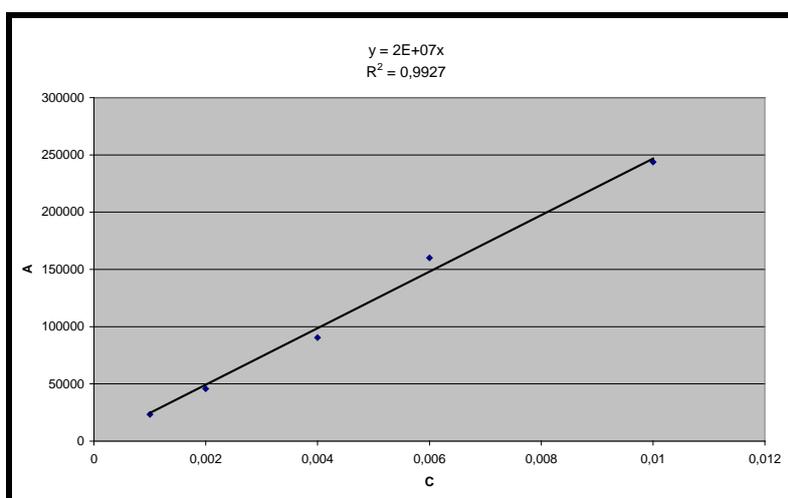
77- Tumbiolo S., Gal J.F., Maria P.C., Laborde P. et Teton S., Échantillonnage rapide des BTEX dans l'air par SPME dans la ville de Nice et à l'aéroport Nice-Côte d'Azur, Pollution atmosphérique, 190, Avril-Juin 2006, pp 185-195

# **ANNEXES**

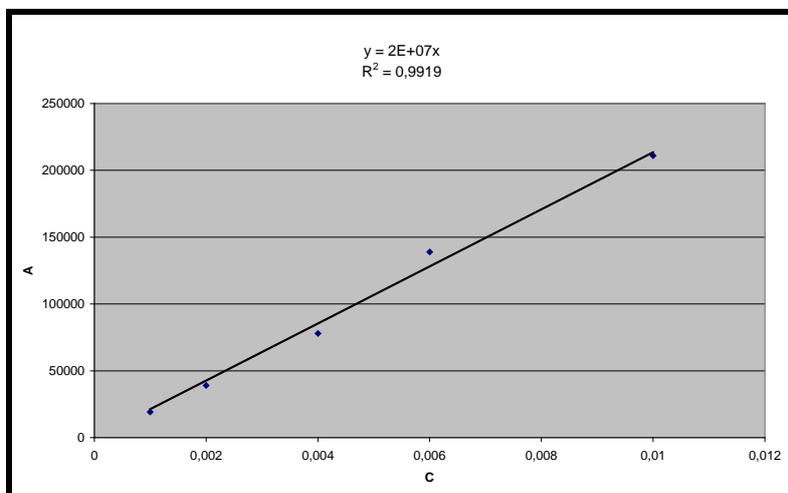
## Annexe n°01 : Courbes d'étalonnages des différents BTEX



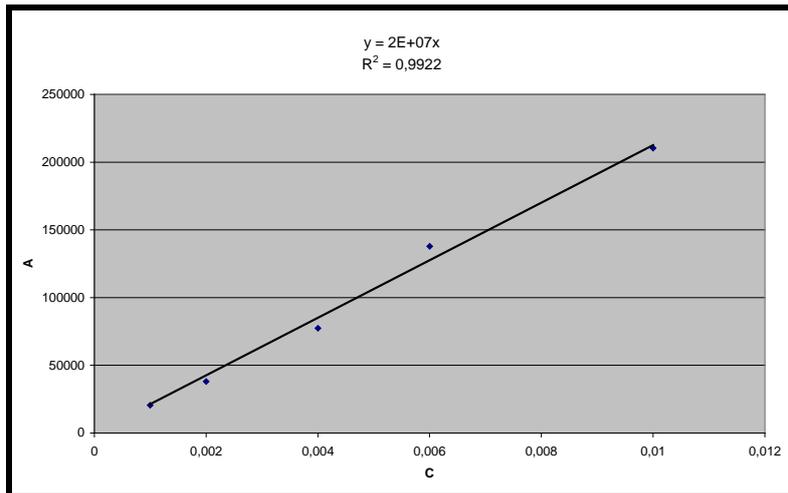
Courbe d'étalonnage de Benzène



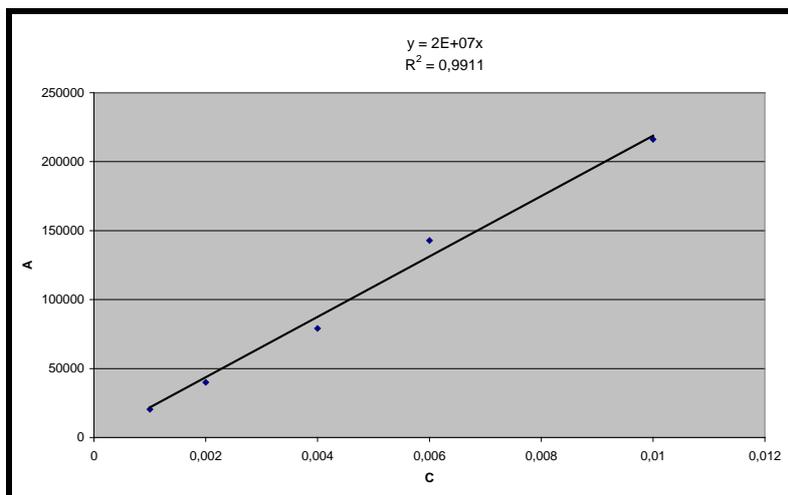
Courbe d'étalonnage de Toluène



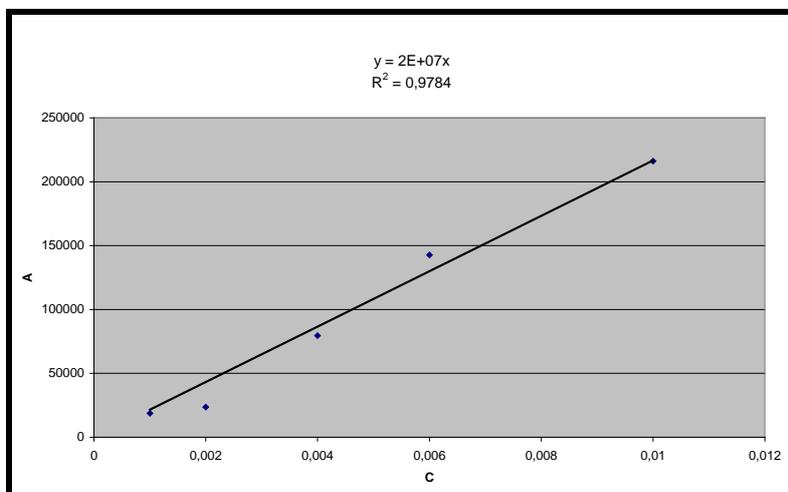
Courbe d'étalonnage de l'Ethylbenzène



Courbe d'étalonnage de p-xylène

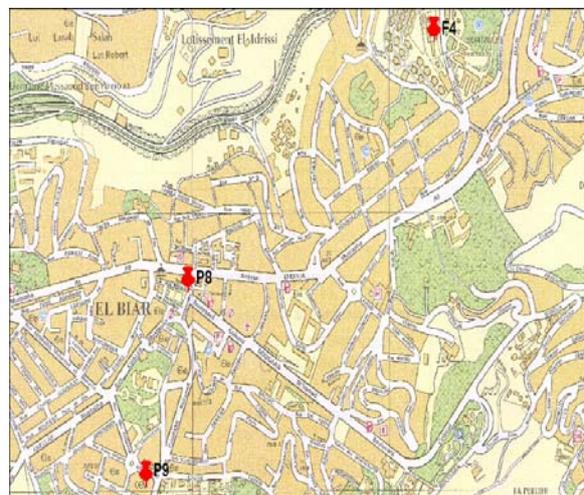
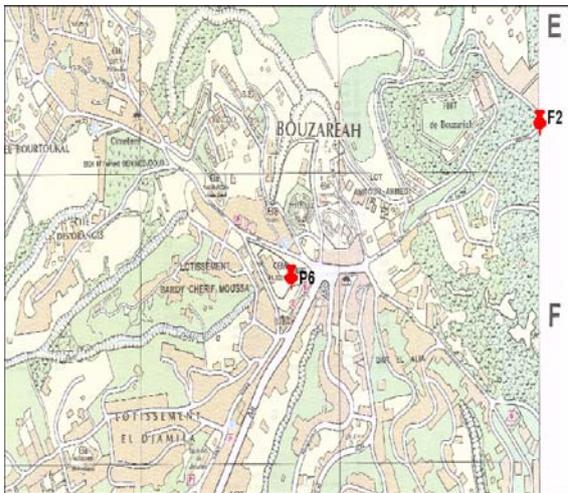
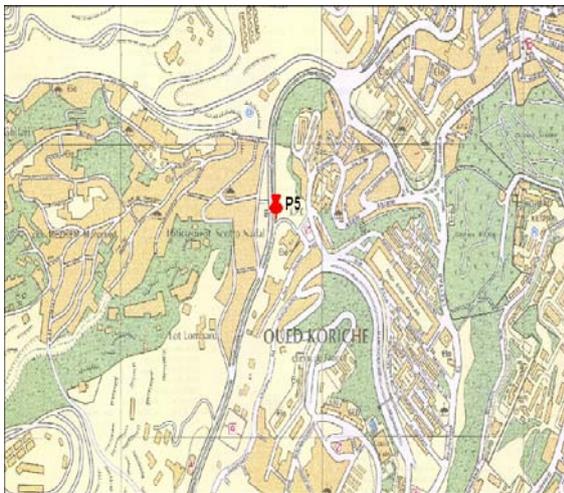
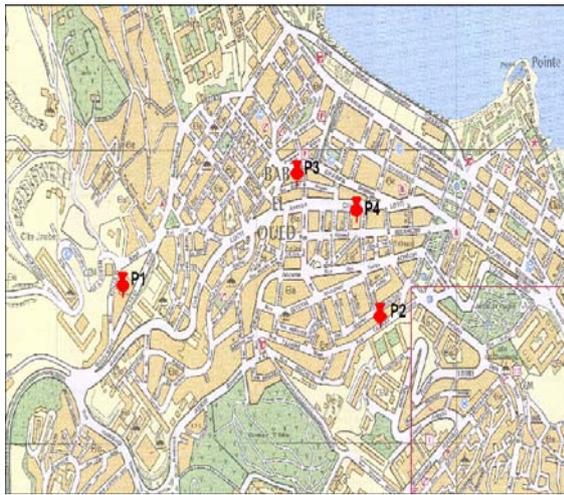


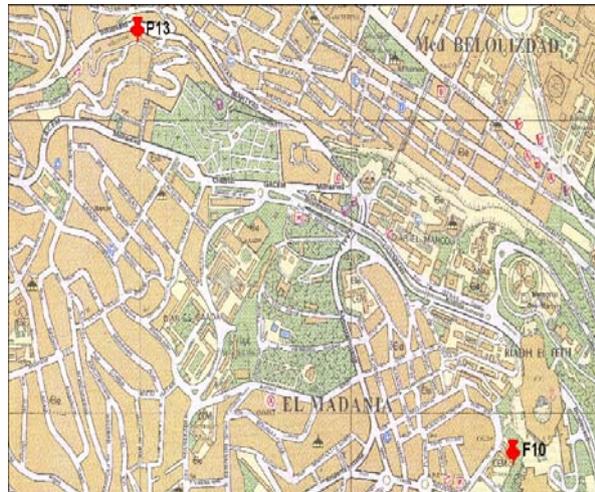
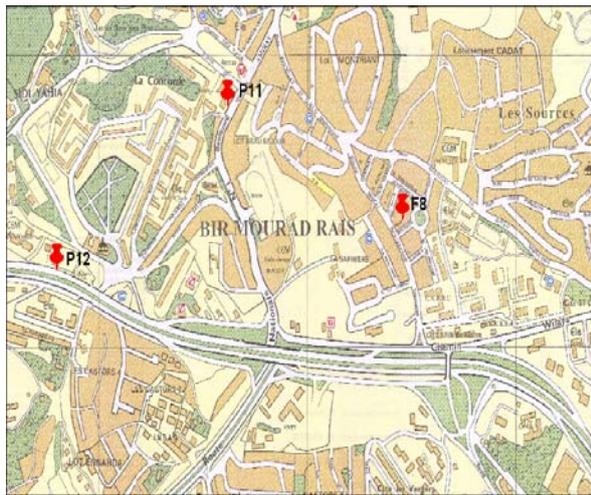
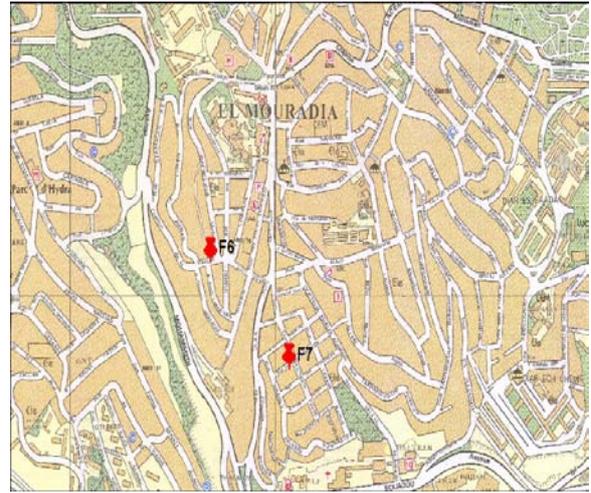
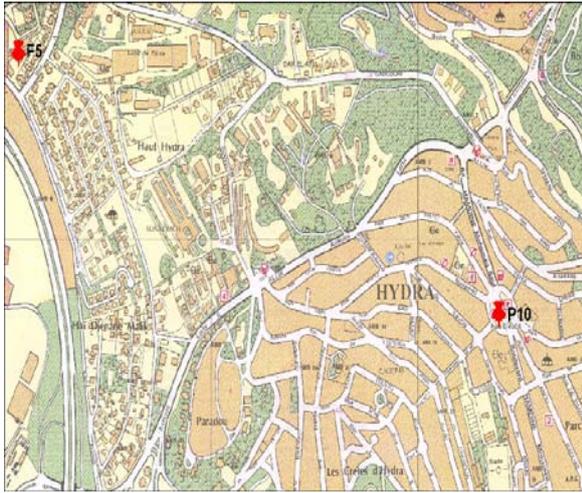
Courbe d'étalonnage de m-xylène

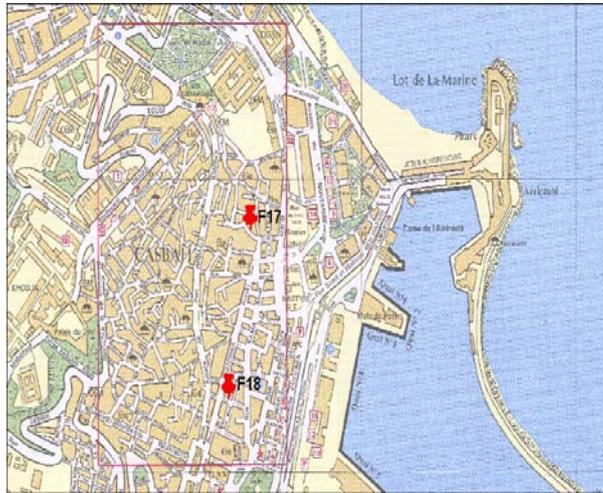
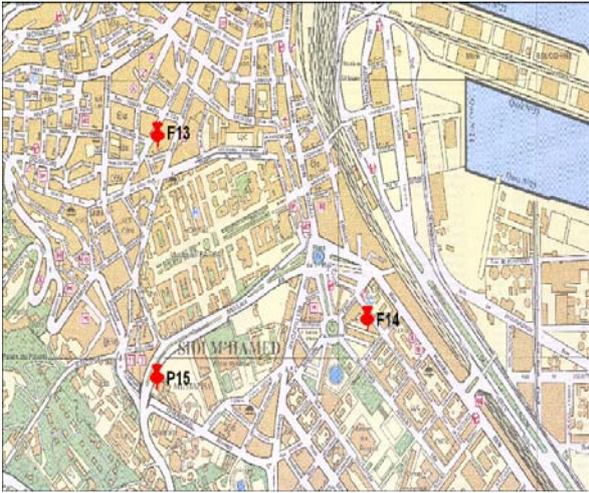


Courbe d'étalonnage de l'o-xylène

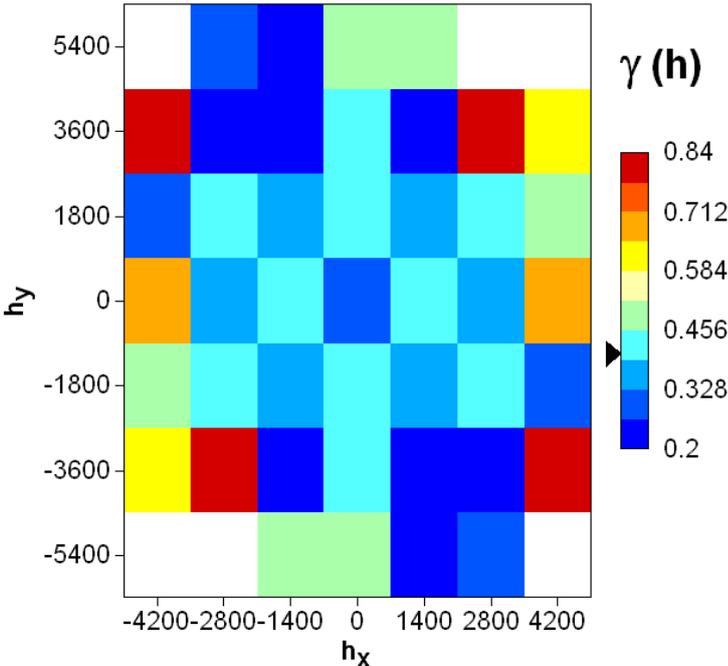
## Annexe n°02 : Localisation exacte des sites d'échantillonnage



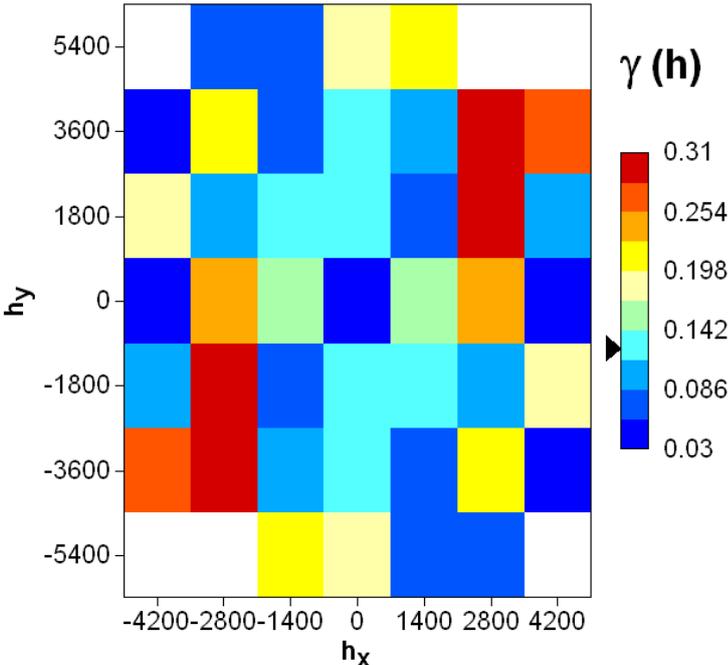




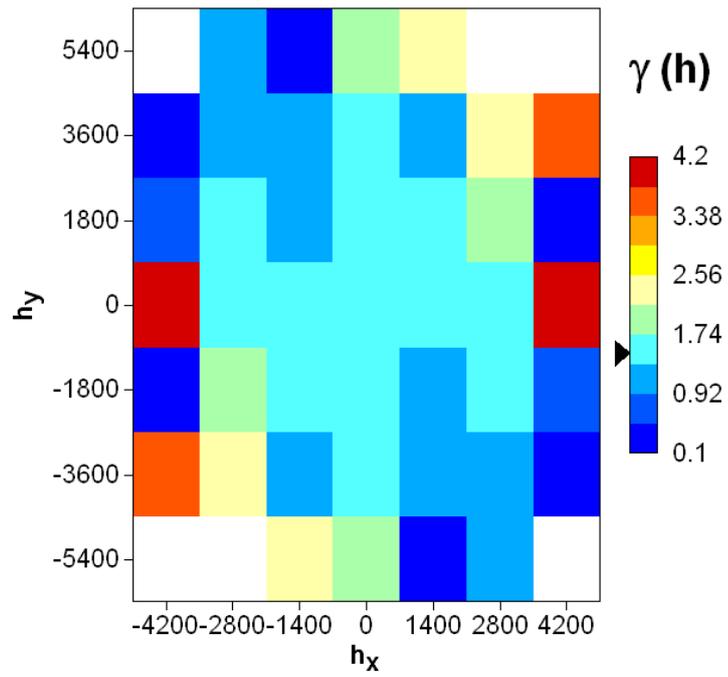
**Annexe 03 : Anisotropie saisonnières des différents BTEX**



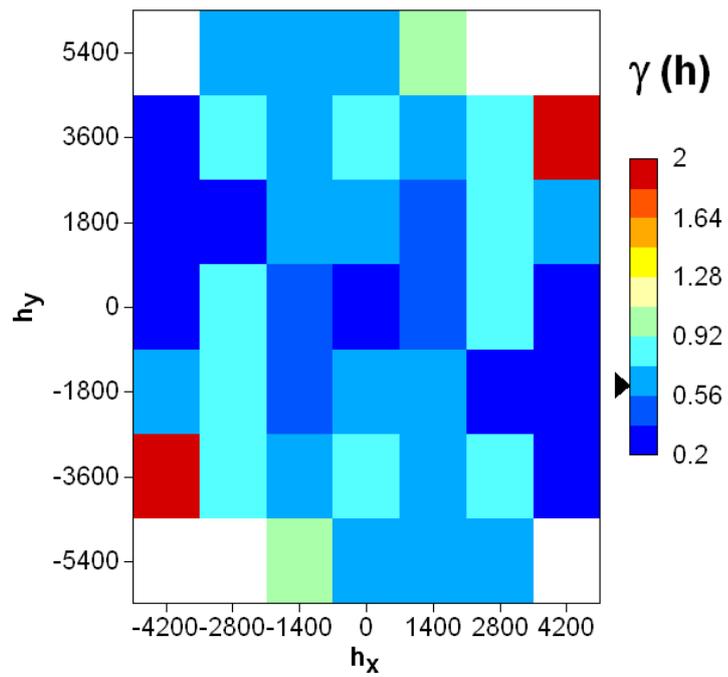
Anisotropie de benzène (été)



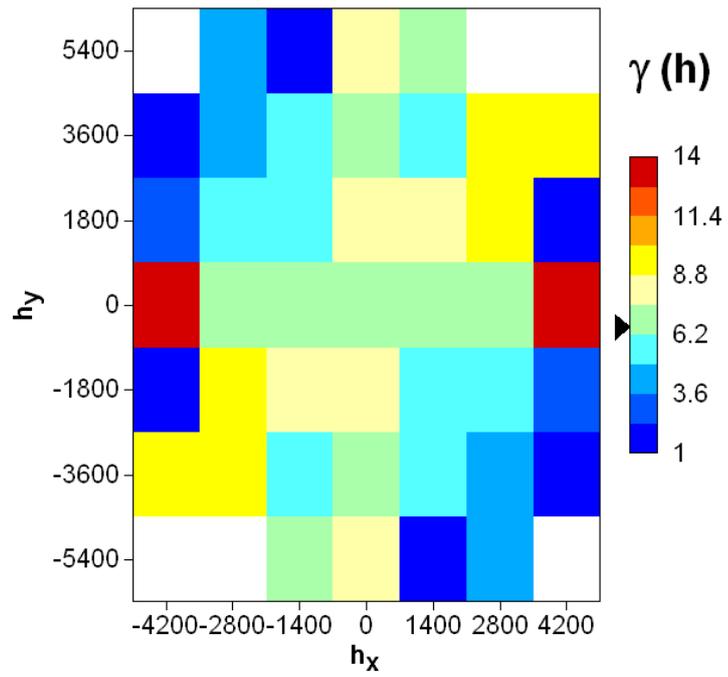
Anisotropie de benzène (hiver)



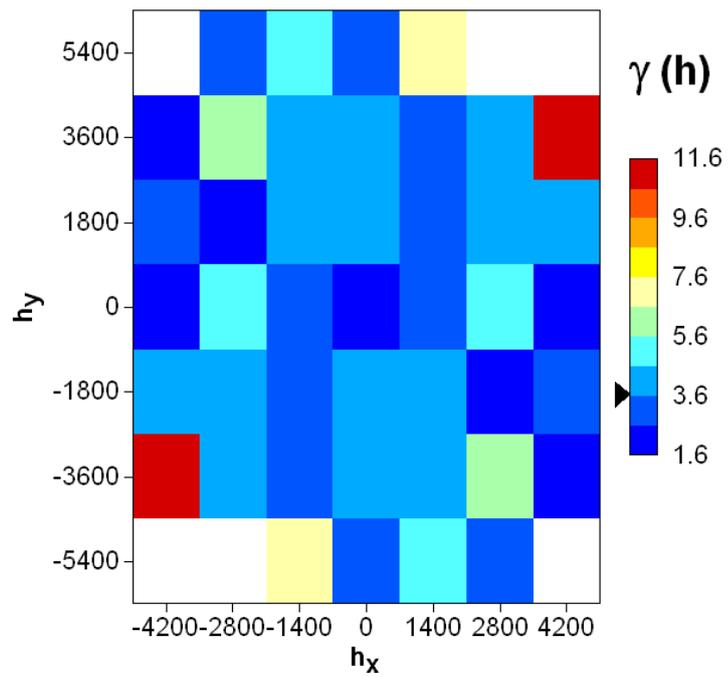
Anisotropie de toluène (été)



Anisotropie de toluène (hiver)

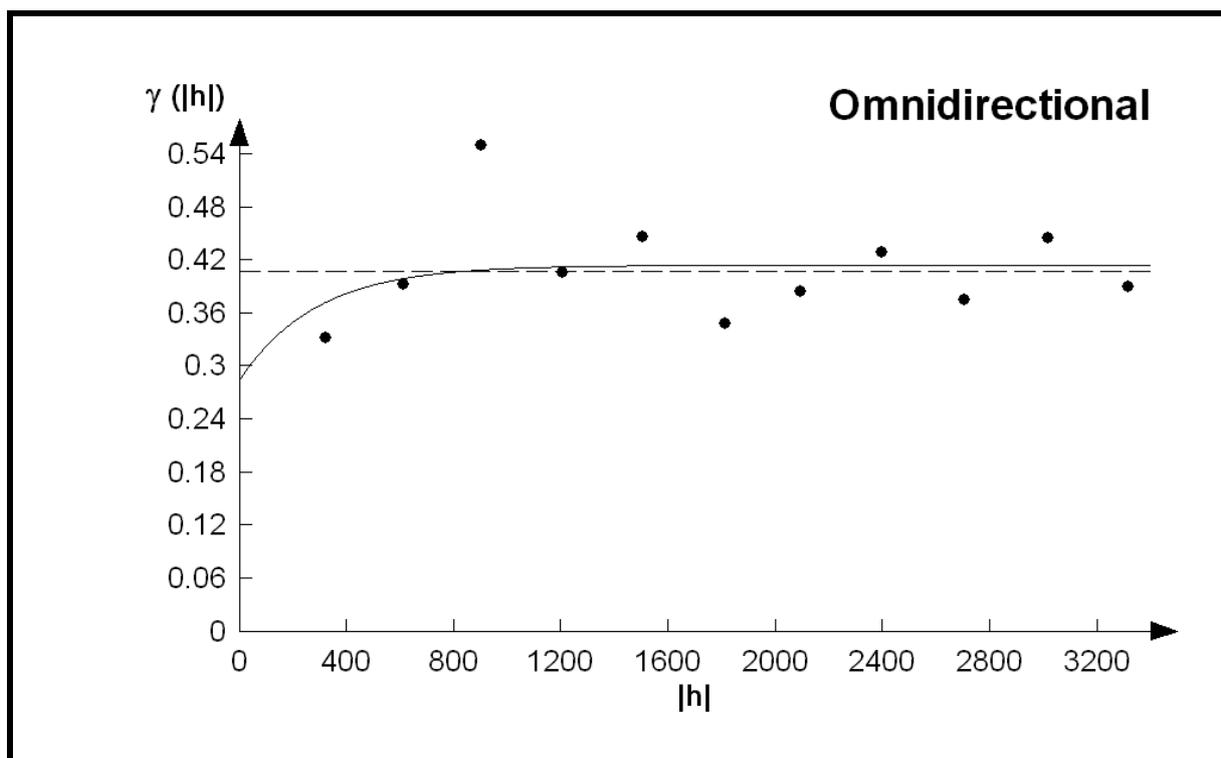


Anisotropie de BTEX totaux (été)

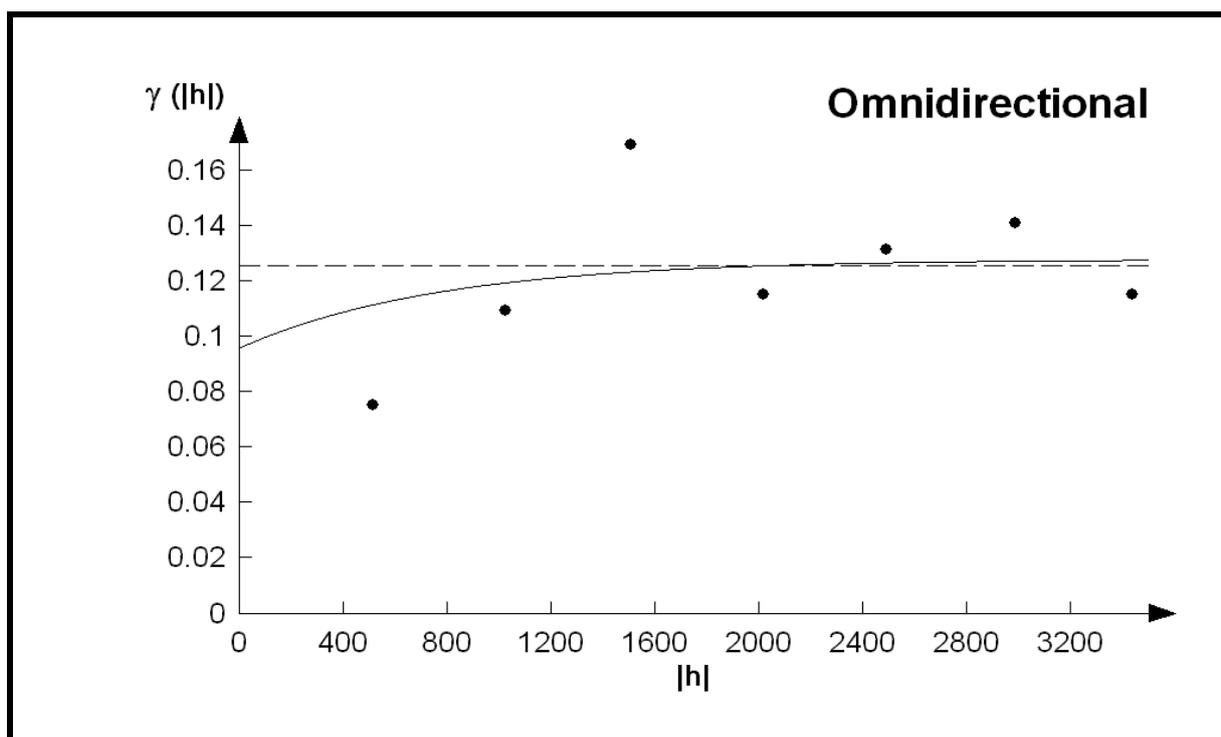


Anisotropie de total BTEX totaux (hiver)

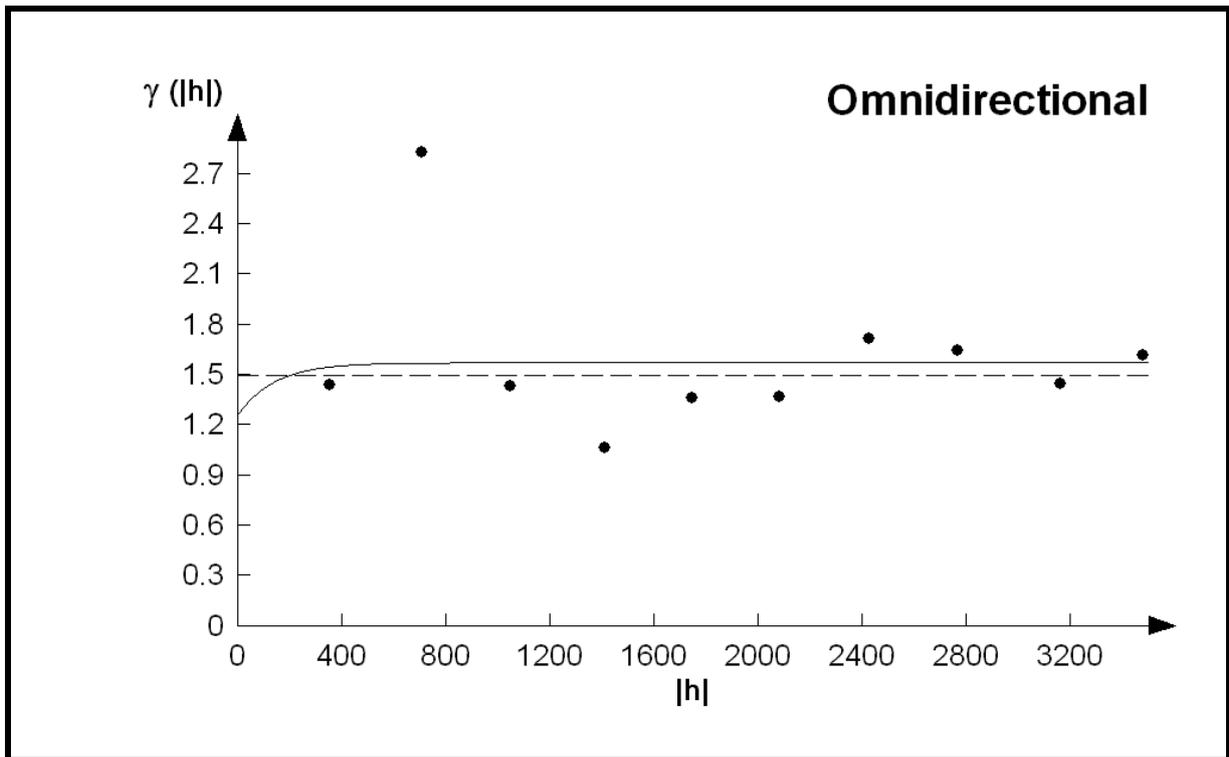
Annexe 04 : Les variogrammes expérimentaux saisonnières



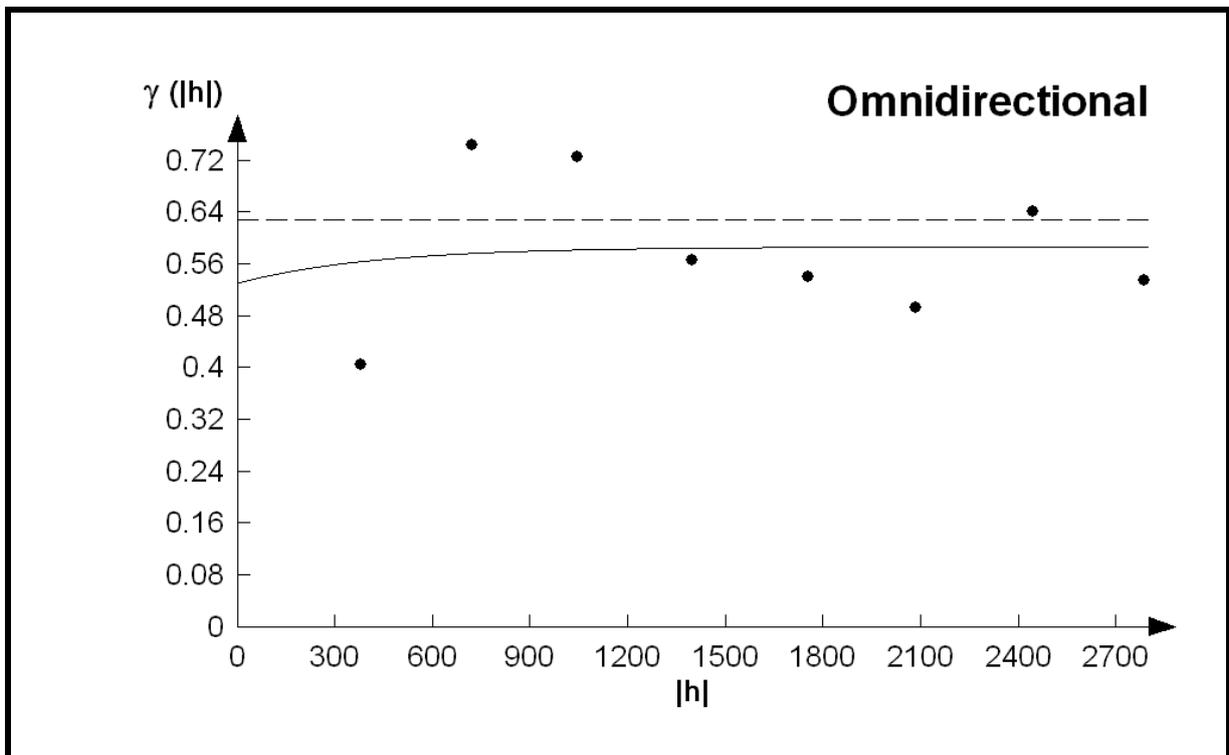
Variogramme expérimental de Benzène (été)



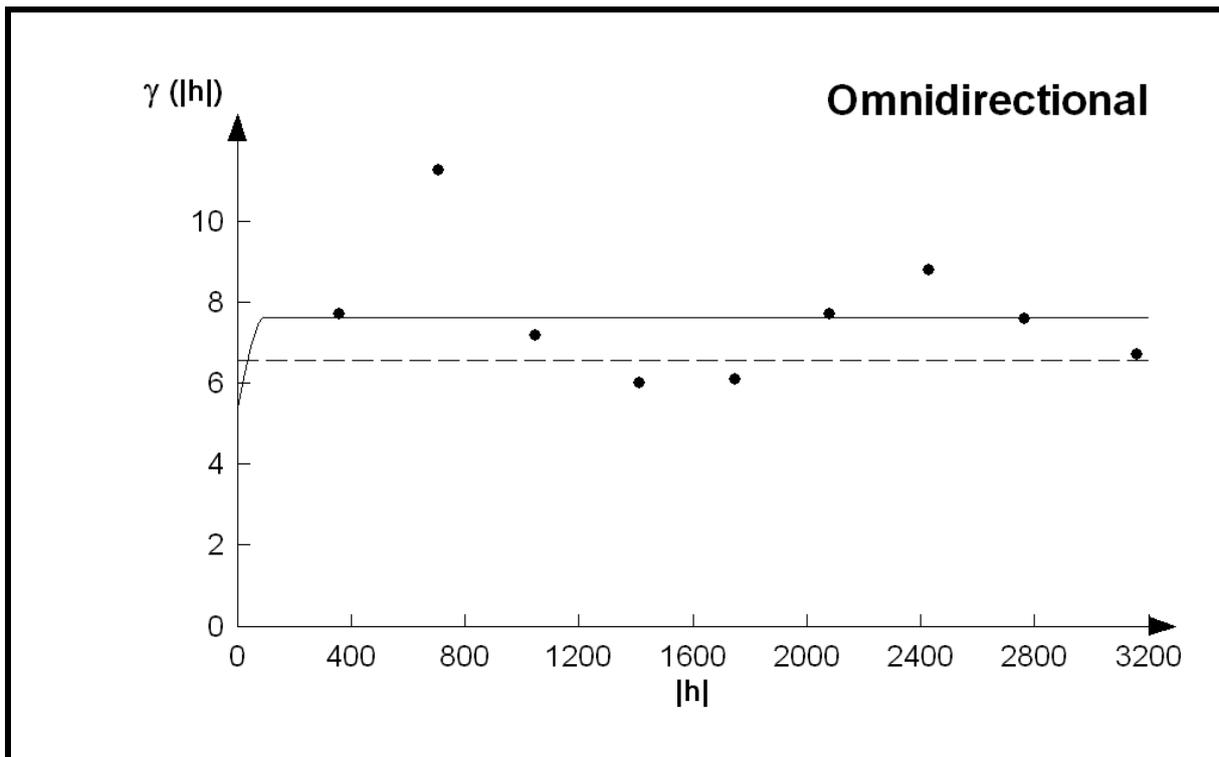
Variogramme expérimental de Benzène (hiver)



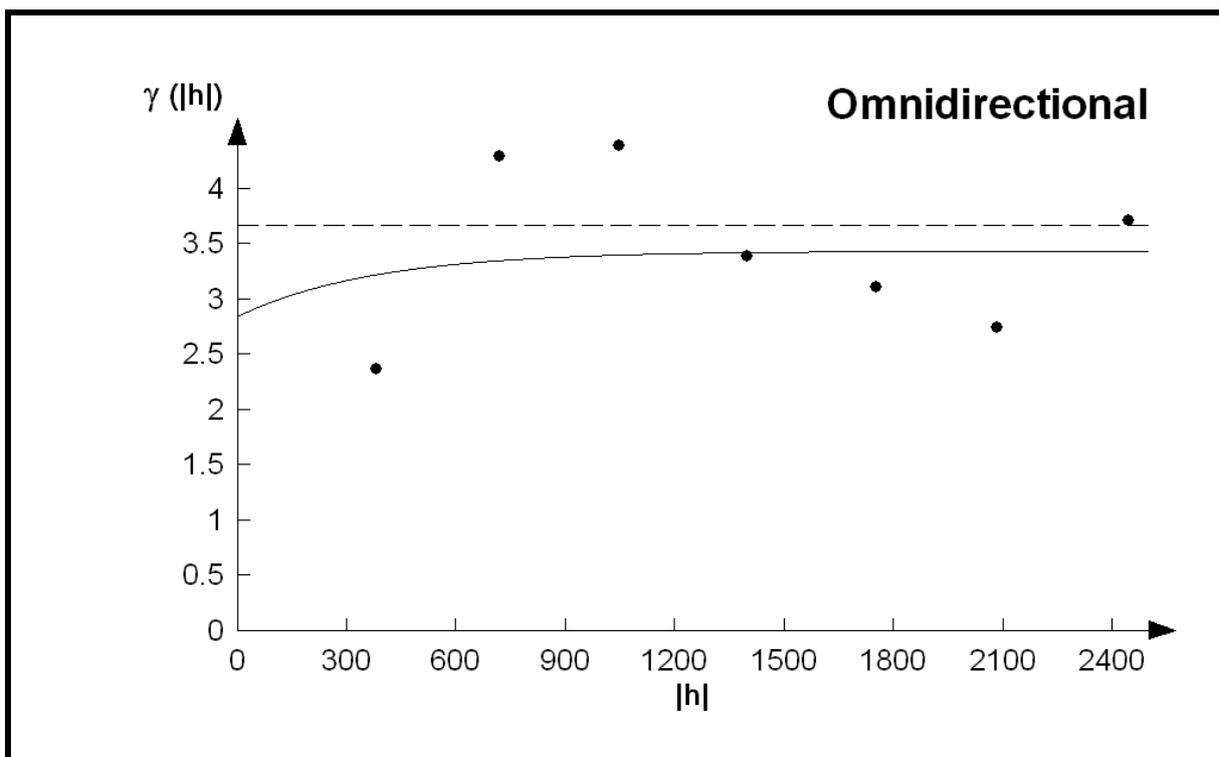
Variogramme expérimental de Toluène (été)



Variogramme expérimental de Toluène (hiver)



Variogramme expérimental de BTEX totaux (été)



Variogramme expérimental de BTEX totaux (hiver)

**Annexe 05 : Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux**

<b>BTEX</b>	<b>Effet de pépité</b>	<b>Palier</b>	<b>Portée</b>	<b>Modèle</b>
Benzène (été)	0,285	849,887	0,129	Exponentiel
Toluène (été)	1,26	419,883	0,315	Exponentiel
BTEX totaux (été)	5,412	96	2,244	Exponentiel
Benzène (Hiver)	0,096	2 310	0,032	Exponentiel
Toluène (Hiver)	0,532	1 259,91	0,056	Exponentiel
BTEX totaux (Hiver)	2,849	1 125	0,592	Exponentiel

## ملخص:

تهتم هذه الدراسة بالتقدير الفضائي و الزماني لتلوث البيئة بـBTEX في بلديات غرب و وسط الجزائر العاصمة بتطبيق تقنية جمع العينات السلبية. لحصر النحرص للتلوث من طرف السكان، فمنا بدراسة المناطق الحضرية و المناطق المجاور للطرق. تم القيام بجمع العينات واحدة صيفية و الأخرى شتوية لدراسة تأثير اختلاف الفصول على الانتشار. النتائج المنحصلة عليها تبين أن تراكيز BTEX المسجلة بالمناطق الجوارية أكبر من المسجلة بالمناطق الحضرية. النسبة بينهما تتعلق بنشاط BTEX. التراكيز المسجلة لـ BTEX في الصيف أكبر من المسجلة في الشتاء ما عدا الأتيلبنزان. خريطة انتشار التلوث بـ BTEX أنجزت بواسطة برنامجي حاسوب VARIOWIN و SURFER 8. هذه الخريطة مكنتنا من الاستنتاج بأن باب الوادي هي البلدية الأكثر تعرضا للتلوث.

الكلمات المفتاح: البنزان، BTEX، تلوث الهواء، حركة المرور، جمع العينات السلبية، جيوساتيستيكك، دراسة الخرائط

## Résumé :

Le présent travail s'intéresse à l'évaluation spatiale et temporelle de la pollution par les BTEX dans les communes d'Ouest et du Centre d'Alger en utilisant le mode d'échantillonnage passif.

Pour appréhender l'exposition à la pollution par la population, nous avons étudié aussi bien des sites urbains de fond que de sites de types station trafic. Deux campagnes d'échantillonnage (estivale et hivernale) ont été réalisées afin d'étudier l'effet saisonnier sur la dispersion.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs des BTEX enregistrées dans les sites de proximité automobile sont plus grandes que celles des sites de fonds. Le rapport entre les deux dépend de la réactivité de BTEX.

Les teneurs en BTEX sont plus élevées pendant l'été par rapport à l'hiver, sauf pour l'éthylbenzène.

La cartographie de la distribution de la pollution par les BTEX a été réalisée à l'aide des logiciels Variowin et Surfer 8. Elle nous a permis de constater que la région de Bab El Oued est la plus atteinte par la pollution par les BTEX.

**Mots clés :** Benzène, BTEX, pollution de l'air, trafic routier, échantillonnage passif géostatistique, cartographie

## Abstract :

This work is interested in the space and temporal evaluation of pollution by the BTEX in the districts of West and of the Center of Algiers by using the mode of passive sampling.

To apprehend the exposure to pollution by the population, we studied as well inside urban sites as of sites proximity. Two sampling campaigns (summer and winter) were carried out in order to study the seasonal effect on dispersion.

The results obtained show that the concentrations of the BTEX recorded in the sites of automobile proximity are superior to those of inside urban sites. The relationship between the two depends on the reactivity of BTEX.

The concentrations of BTEX are higher during the summer compared to the winter, except for ethylbenzene.

The cartography of the distribution of pollution by the BTEX was carried out using the software Variowin and Surfer 8. We concluded that district of Bab El Oued is the most polluted by the BTEX.

**Keywords:** Benzene, BTEX, Air pollution, Road traffic, Passive sampling, geostatistic, cartography.