

**Conseil Exécutif des Transports
Urbains de Dakar (CETUD)**
Route de Front de Terre, B.P. 17 265 Dakar-Liberté
Tél. n°(221) 859 47 20 - Fax n°(221) 832 47 44
E-mail.: cetud@telecomplus.sn

Norwegian Institute for Air Research
P.O. Box 100, N-2027 Kjeller, Norvège
Tél. n°(47) 63898000 – Fax n°(47) 63898050
e-mail: cbg@nilu.no



FINANCEMENT: Fonds Nordique de Développement	Rapport de Projet	
--	--------------------------	--

Projet:	ASSISTANCE TECHNIQUE A LA MISE EN PLACE DU LABORATOIRE CENTRAL ET DES STATIONS DE MESURES POUR L'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'AIR EN MILIEU URBAIN DE DAKAR
Contrat:	No 003/C/FND/05

Etude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air à Dakar 2005

Octobre - décembre 2005 et janvier 2006

Bjarne Sivertsen, Herdis Laupsa et Cristina Guerreiro



RAPPORT N°:	2b
REFERENCE CONSULTANTS:	O-105010 OR 58/2006
REV. NO:	Version 1 (19.05.06)
Nom de la Tâche:	Tâche 2 - Evaluation des niveaux de qualité de l'air dans la ville de Dakar
ISBN:	82-425-1783-5

Table des matières

	Page
1 Introduction.....	3
2 Conception de l'étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air	4
2.1 Sources d'émissions	4
2.1.1 Composants et indicateurs	4
2.2 Conditions Météorologiques	5
2.2.1 Vitesse et directions du vent.....	5
3 Instruments et échantillonneurs	7
3.1 Les échantillonneurs passifs de SO ₂ , NO ₂ et O ₃	7
3.2 L'échantillonnage des Composés Organique Volatils (COV)	8
3.3 Les échantillonneurs de particules fines PM.....	8
3.3.1 SEQ47/50.....	8
3.3.2 Instrument de surveillance des aérosols Dust Trak.....	8
3.4 Echantillonnage et contrôle du CO	8
4 Valeurs limites de la QA.....	9
4.1 Valeurs limites de la QA – SO ₂	9
4.2 Valeurs limites de la QA – NO ₂	9
4.3 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – PM ₁₀ et PM _{2,5}	10
4.4 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – CO	11
4.5 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – VOC (Benzène).....	11
4.6 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – O ₃	12
4.7 Valeurs limites de la qualité de l'air – oligo-éléments	12
5 Sites d'échantillonnage dans Dakar	13
6 Concentrations mesurées	15
6.1 Echantillonnage NO ₂	15
6.2 Echantillonnage SO ₂	17
6.3 Echantillonnage O ₃	18
6.4 Contrôle CO	19
6.5 Composés Organiques Volatils (COV)	21
6.5.1 Composés Organiques Volatils Totaux (COVT).....	21
6.5.2 Benzène	22
6.6 Les Particules Fines.....	22
6.6.1 PM ₁₀	22
6.6.2 PM _{2,5}	24
6.6.3 Polluants inorganiques.....	25
6.6.4 Matières Carbonées Totales (TCM)	27
6.6.5 Composants hydrosolubles.....	28
6.6.6 Résumé de l'analyse chimique de concentrations de PM	29
7 Discussion et conclusion	30
8 Références.....	31



Annexe A	Classification des sites sélectionnés et des composants à mesurer.....	33
Annexe B	Analyse des métaux	37
Annexe C	Analyses des composants hydrosolubles	41
Annexe D	Rose des vents Dakar (1997-2001)	45

1 Introduction

Le Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD) a demandé à l'Institut Norvégien de Recherche sur l'Air (NILU) de l'assister dans la création d'un Laboratoire Central doté d'un système de gestion de la qualité de l'air pour Dakar. Ce projet fait partie de la composante "Amélioration de la qualité de l'air en milieu urbain" (QADAK) du "Programme d'Amélioration de la Mobilité Urbaine" (PAMU) mis en œuvre par le Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar (CETUD).

Une étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air à Dakar a été effectuée entre octobre 2005 et janvier 2006. L'objectif principal était de collecter l'information de base nécessaire à la conception d'un programme de suivi permanent de la qualité de l'air de la région.

Les échantillonneurs passifs de NO_2 , SO_2 , COV et O_3 ont été placés sur environ 50 sites de mesure choisis dans la ville de Dakar et dans des zones de banlieues environnantes. L'échantillonnage passif de SO_2 , NO_2 et O_3 a été effectué en octobre et les échantillonneurs ont été exposés pendant 4 semaines. Au début du mois d'octobre, les échantillonneurs passifs de COV ont été exposés pendant plus de 3 à 7 jours, selon leurs emplacements. Une nouvelle campagne d'échantillonnage d' O_3 a été effectuée en janvier 2006, en raison de problèmes survenus lors de l'analyse de l'échantillonnage du mois d'octobre.

Un échantillonneur séquentiel de particules suspendues (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$), ainsi qu'un moniteur de CO a été placé dans une rue à forte fréquentation dans le centre ville. Les mesures de PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ et CO ont été effectuées à cette station principale du 5 octobre 2005 au 2 janvier 2006.

Quelques échantillons de PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ ont par ailleurs été analysés afin d'avoir une information sur la composition chimique des particules fines à Dakar. Les analyses chimiques suivantes ont été effectuées :

- Oligo-éléments, comme le Plomb (Pb), Cadmium (Cd), Vanadium (V) et Arsenic (As), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Chrome (Cr), Nickel (Ni), Cobalt (Co) ;
- Carbone organique (OC) et carbone élémentaire (EC)
- Composants hydrosolubles comme le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), le nitrate (NO_3), le sulfate (SO_4), l'ammonium (NH_4) et le chlorure (Cl), qui donnent une indication de la contribution du sel marin à la formation de particules et de quelques sources anthropogènes.

En plus du programme d'échantillonnage présenté ci-dessus, des mesures de courte durée ont été réalisées en parallèle, entre le 3 et le 7 octobre 2005, dans des secteurs de la ville spécialement ciblés.

L' échantillonnage de court durée ciblait PM_{10} , COV et CO. Le but de cette étude était d'identifier les concentrations de fond et les points sensibles potentiels.

Ce rapport est aussi disponible en anglais (OR 17/2006).

2 Conception de l'étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air

La conception de l'étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air s'est basée sur l'identification des principales sources d'émission et des secteurs où l'impact de la pollution est le plus élevé, ainsi que sur les données existantes relatives à la qualité de l'air et la météorologie (Guerreiro et. al., 2005a ; Guerreiro et. al., 2005b).

Les sites ont été choisis selon trois critères principaux:

1. Prise en compte de différents micro-environnements (rue 'canyon', bord de route, environnement urbain de fond, zone industrielle, zone régionale de fond etc.);
2. Sélection des composants à mesurer dans les différents micro-environnements en fonction des sources d'émission;
3. Directions des vents dominants durant la campagne de mesure.

2.1 Sources d'émissions

Les zones industrielles les plus importantes et les secteurs à trafic intense ont été identifiés. Selon ce premier inventaire des sources d'émission, les plus importantes à Dakar semblent être les sources au niveau du sol.

De manière générale, il semble que les embouteillages sur certaines des routes principales produisent des émissions de CO élevées. La haute densité du trafic sur les routes principales entraîne aussi de grandes émissions de NO_x et de particules. L'activité générale de la ville semble produire de hauts niveaux de fond de particules suspendues. Les secteurs industriels, situés principalement dans la partie orientale de la ville (par exemple le secteur des Grands Moulins) constituent des sources d'émissions de PM, SO₂, COV et NO_x.

2.1.1 Composants et indicateurs

Un certain nombre d'indicateurs de pollution atmosphérique ont été choisis pour identifier le niveau de qualité de l'air à Dakar. La sélection des composants à mesurer dans les différents micro-environnements a été décidée en fonction de la présence de sources d'émission ponctuelles. Une liste d'indicateurs typiques est présentée dans la Table 1 ci-dessous.

Table 1: Indicateurs de pollution de l'air mesurés dans divers micro-environnements.

Station type /Microenvironnement	Composants
Environnement régional de fond	NO ₂ , SO ₂ , PM ₁₀ , O ₃
Industrie	NO ₂ , SO ₂ , VOC, O ₃ , PM ₁₀
Centre ville	NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, COV
Trafic/rue canyon	NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO, COV, PM ₁₀
Environnement urbain de fond	NO ₂ , SO ₂ , O ₃

Périurbain	NO ₂ , SO ₂ , O ₃
------------	--

L'ozone est un polluant secondaire formé par des réactions chimiques dans l'atmosphère. Les mesures d'ozone, particulièrement dans l'environnement de fond, sont essentielles pour comprendre la formation de NO₂ dans la ville.

2.2 Conditions Météorologiques

Les données climatologiques (issues de modèles de prévisions météorologiques et d'observations directes) montrent que les vents dominants à Dakar proviennent approximativement du Nord. En octobre, novembre et décembre les vents proviennent principalement du Nord, Nord / Nord-Ouest, Nord / Nord-Est. La plupart des échantillonneurs ont donc, dans la mesure du possible, été placés au sud des principales sources d'émission. La plupart des échantillonneurs ont été placés le long de traverses perpendiculaires au vent dominant. Le programme d'échantillonnage a été, autant que possible, conçu autour de cinq traverses.

Les données météorologiques de la période d'échantillonnage ont été collectées au CERER (CERER, communications personnelles). Les moyennes sur dix minutes des vitesses de vent, de la direction de vent et de la température ont été collectées au niveau d'un pylône météorologique de 15 m de haut. Les moyennes horaires utilisées dans l'analyse ont été calculées à partir de ces moyennes sur 10 mn.

Les données météorologiques relatives à trois périodes différentes d'échantillonnage et de suivi ont été évaluées séparément.

2.2.1 Vitesse et directions du vent

Pendant la période d'évaluation de l'état de la pollution de l'air, le vent dominant était de Nord et Nord / Nord-Ouest (CERER, communications personnelles). Ainsi que le montre la Figure 1 :

- La vitesse des vents a été pendant 82 % du temps inférieure à 2m/s.
- La fréquence des vitesses de vent supérieures à 4m/s a été inférieure à 0.4%.

En moyenne, la direction du vent dominant pendant les trois mois d'octobre à décembre donne la même image que la moyenne annuelle (Annexe D). Celle-ci indique (Figure 1) que:

- Les vents viennent principalement du Nord et du Nord / Nord-Est.
- La fréquence des vitesses de vent inférieures à 2 m/s est de 63 %

Les conditions météorologiques pendant la période de mesure semblent être représentatives des conditions générales de vent.

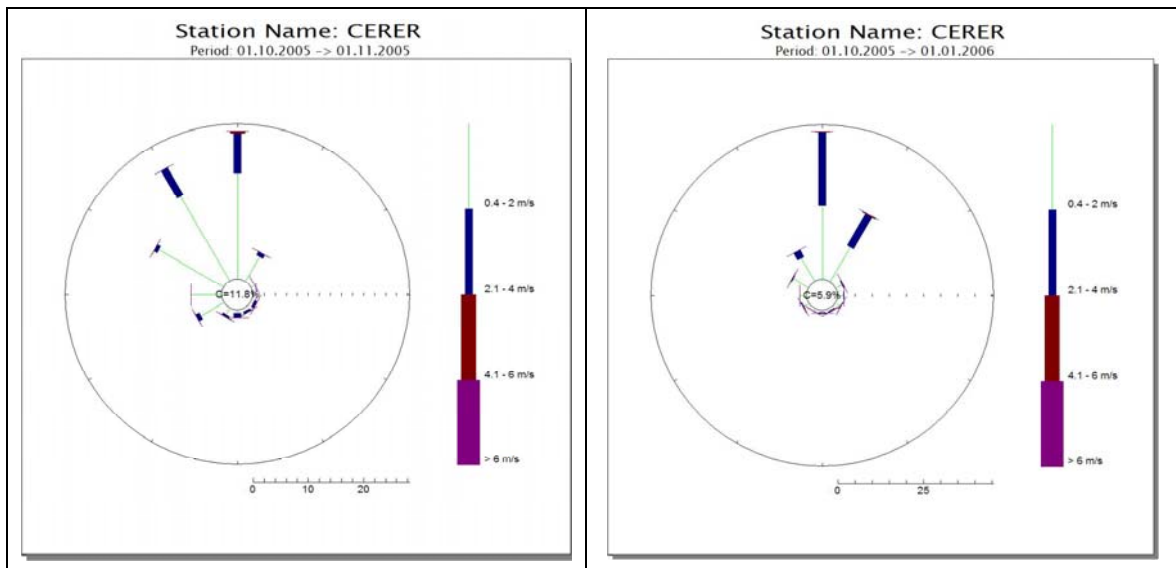


Figure 1: Distribution du vent calculée (rose des vents) a) octobre 2005 et b) d'octobre à décembre 2005.

Les mesures de stabilité ou de turbulence ne sont pas disponibles pour la période de collecte de données. Comme attendu, la vitesse du vent est en moyenne très basse pendant la nuit (Figure 2). Avec de basses vitesses de vent et en supposant un ciel dégagé et une radiation de chaleur en surface, on s'attend à une apparition au cours de la nuit de conditions météorologiques stables.

Les conditions de vitesse de vent pendant le jour indiquent des conditions neutres ou instables et une couche limite atmosphérique bien mélangée. C'est en fin de soirée que l'on enregistre en moyenne la plus haute vitesse de vent.

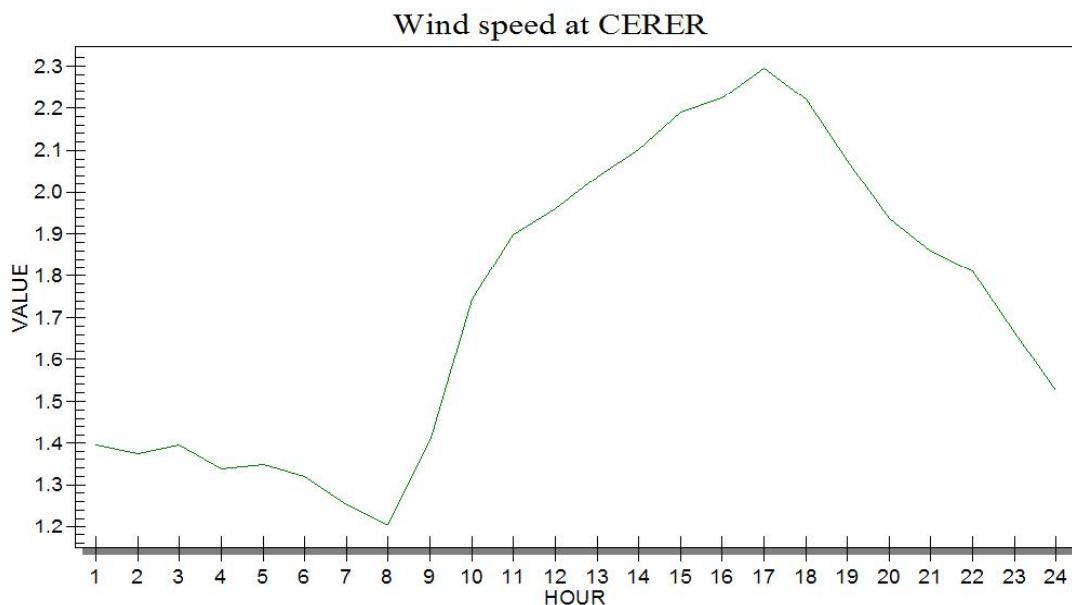


Figure 2: Variations diurnes calculées à partir d'octobre 2005 incluant décembre 2005.

3 Instruments et échantillonneurs

3.1 Les échantillonneurs passifs de SO₂, NO₂ et O₃

L'Institut Suédois de Recherche Environnementale a mis au point un échantillonneur à diffusion sensible de dioxyde de soufre (SO₂), de dioxyde d'azote (NO₂) et d'ozone (O₃) présents dans l'air ambiant (IVL, 2006). Cette méthode a été utilisée dans plusieurs enquêtes pour effectuer une évaluation de l'état de la distribution de la concentration spatiale.

L'échantillonneur comprend un filtre imprégné placé à l'intérieur d'un petit tube en plastique. Pour éviter les turbulences à l'intérieur de l'échantillonneur, son entrée est recouverte d'un filtre formé d'une fine membrane poreuse (comme indiqué sur Figure 3). Les gaz sont transportés et collectés par diffusion moléculaire.

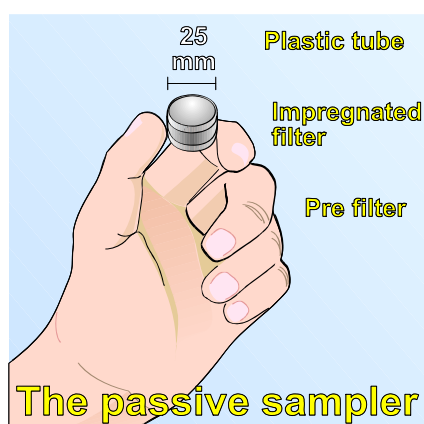


Figure 3: L'échantillonneur passif.

On doit souligner que ces échantillonneurs fournissent des concentrations cumulées sur une période de temps continue. Les concentrations moyennes sont calculées en fonction de la durée de leur exposition à l'air ambiant. Cette durée peut être journalière, hebdomadaire, mensuelle etc.

La technique d'échantillonnage est basée sur la propriété de diffusion moléculaire des gaz. Les molécules de gaz se diffusent dans l'échantillonneur où elles sont quantitativement collectées sur un filtre imprégné ou sur un matériau absorbant imprégné avec une solution spécifique à chaque polluant mesuré. Ainsi on obtient une concentration intégrée (moyenne) sur la période d'exposition. Il n'y a pas besoin d'électricité, de pompes ou d'aucun autre appareil.

Le taux de prélèvement dépend seulement du taux de diffusion du gaz. Le taux de collecte est de 31 l/24h pour le SO₂ et 36 l/24h pour le NO₂.

Après exposition les échantillonneurs sont habituellement retournés à NILU où les concentrations de SO₂ sont déterminées sous forme de sulfates par chromatographie ionique. Les concentrations de NO₂ sont déterminées par spectrophotométrie. Les

échantillons de O₃ sont analysés à l'Institut Suédois de Recherche Environnementale (IVL).

3.2 L'échantillonnage des Composés Organique Volatils (COV)

Les échantillons de COV sont collectés dans des tubes d'adsorption remplis de Chromosorb ou Tenax TA. Les échantillons peuvent être prélevés par échantillonnage passif (échantillonnage par diffusion) ou par échantillonnage actif (échantillonnage par pompe). L'analyse est faite par NILU par thermo-désorption suivie d'une analyse combinée par chromatographie gazeuse - spectrométrie de masse (GC-MS). On utilise des tubes d'adsorption standardisés Perkin-Elmer.

La méthode répond à la norme (CEN/TC 264) du CEN/DIN, et elle est largement utilisée comme technique de mesure standard pour contrôler les niveaux de BTEX et de COV dans des villes européennes. La précision de cette méthode est supérieure +/-10 %.

3.3 Les échantillonneurs de particules fines PM

3.3.1 SEQ47/50

L'instrument utilisé pour le contrôle journalier de PM₁₀ et PM_{2.5} est un échantillonneur gravimétrique séquentiel, de type SEQ47/50. L'échantillonneur séquentiel est conçu pour une utilisation extérieure, quelles que soient la température et les conditions environnementales. Cette technique de mesure est une méthode de référence de la Commission européenne. L'échantillon d'air est aspiré au niveau de l'entrée (une entrée par taille de particules) par une pompe à vide, et les particules se déposent sur un filtre. L'appareil est équipé d'un réservoir de 15 filtres, qui sont automatiquement changés après exposition de 24 heures. Les filtres sont pesés par NILU avant et après exposition. Les concentrations correspondantes de PM₁₀ et PM_{2.5} sont calculées sur la base du flux d'air et du poids.

3.3.2 Instrument de surveillance des aérosols Dust Trak

Pour les mesures de courte durée de PM₁₀ dans différents micro-environnements de la zone urbaine, l'instrument de surveillance des aérosols « TSI's DustTrak Aerosol Monitor (8520) » a été utilisé. Le DustTrak est un photomètre laser portatif fonctionnant sur piles. La lumière émise par la diode laser est diffusée par les particules qui sont aspirées dans l'appareil selon un flux constant. La quantité de lumière diffusée détermine la concentration en masse des particules, selon un facteur de calibrage. L'instrument a une résolution de masse de ±0.1% ou 1 µg m⁻³ (on retient la plus grande valeur) et un intervalle de détection de 0.1–10 µm (PM_{0.1–10}) (TSI, 2003). Le DustTrak permet de détecter des problèmes pouvant être liés à des agents de contamination présents dans l'air tels que poussières, fumées ou buées.

Des tests comparatifs des concentrations de PM₁₀ mesurées avec divers instruments montrent que la précision du Dust Trak dépend de son calibrage pour différentes profondeurs optiques.

3.4 Echantillonnage et contrôle du CO

Un instrument TSI Q-trak a été utilisé pour mesurer les concentrations horaires de CO et les moyennes sur des périodes de mesure courtes de 10 minutes. L'instrument est

calibré par TSI selon la norme NIST. Presisjons Teknikk AS en Norvège effectue un calibrage et une maintenance annuelle des instruments utilisés.

4 Valeurs limites de la QA

Des Normes sur la Qualité de l'Air ont été établies au Sénégal (NS 05-062, 2003). Les résultats de l'étude d'évaluation de la pollution de l'air sont comparés à ces normes. Ces résultats ont également été commentés en se référant à certaines valeurs limites internationales et directives (UR, 1999; OMS, 2000).

4.1 Valeurs limites de la QA – SO₂

SO₂ fait partie des polluants aériens "classiques" qui ont été retenus pour indiquer un risque pour la santé humaine, aussi bien que pour les écosystèmes, lorsqu'il apparaît avec des niveaux de concentration élevés.

SO₂ produit par l'homme résulte de la combustion du soufre contenu dans des combustibles fossiles (principalement le charbon et les huiles lourdes). L'industrie, le trafic et d'autres processus de combustion utilisant des combustibles fossiles contenant en soufre en sont les sources dominantes.

Un résumé de la norme SO₂ pour le Sénégal, ainsi que les valeurs limites de la Commission Européenne (EU, 1999) et les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2000) sont présentés dans la Table 2.

Table 2: Norme de qualité de l'air, valeurs limites et directive pour SO₂.

Effet	Période Moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
	10 min			500 µg/m ³
Santé	1 heure		350µg/m ³ ¹	
Santé	24 heures	125 µg/m ³	125 µg/m ³ ²	125µg/m ³
Ecosystèmes	Année civile et hiver	50µg/m ³	20µg/m ³	50µg/m ³

4.2 Valeurs limites de la QA – NO₂

Les effets environnementaux de NO₂ incluent des effets sur la santé humaine et l'écosystème et des dégâts matériels causés par la concentration dans l'air et le dépôt de composés azotés.

Les émissions d'oxydes d'azote proviennent principalement de sources de combustion anthropogènes. Les principales sources anthropogènes sont mobiles ou stationnaires.

La norme NO₂ pour le Sénégal, les valeurs limites de la Commission Européenne (EU, 1999) et les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2000) sont présentées dans la Table 3.

¹ Ne doit pas être dépassé plus de 24 fois par année civile.

² Ne doit pas être dépassé plus de 3 fois par année civile.

Table 3: Norme de qualité de l'air, valeurs limites et directive pour NO₂.

Effet	Période Moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
Santé	1 heure	200µg/ m ³	200µg/ m ³³	200µg/m ³
Santé	Année Civile	40µg/m ³	40µg/m ³⁴	40 µg/m ³

4.3 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – PM₁₀ et PM_{2.5}

Les particules fines suspendues dans l'air (PM) peuvent être de nature primaire ou secondaire. Les particules primaires sont émises directement dans l'atmosphère par des processus naturels ou anthropogènes, tandis que les particules secondaires sont principalement générées par l'homme et sont formées dans l'atmosphère par l'oxydation du dioxyde de soufre, des oxydes d'azote et des COV, et ses réactions subséquentes.

Les sources les plus significatives sont le trafic, les centrales électriques, les sources de combustion (industrielles et résidentielles) et les feux de brousses provoqués par l'homme, mais aussi des sources non liées à une combustion telles que la poussière s'échappant des activités industrielles, du chargement/déchargement de marchandises en vrac et des activités d'extraction, la construction de bâtiments. Les principales sources naturelles de particules véhiculées par l'air sont les embruns marins et la remise en suspension de sols par le vent. La poussière du Sahara et les émissions volcaniques peuvent également constituer d'importantes sources naturelles de particules.

Les valeurs limites de la Commission Européenne (EU, 1999) et les normes pour le Sénégal sont présentées dans la Table 4. Pour PM₁₀ les standards pour le Sénégal sont beaucoup plus élevés que les valeurs limites de l'UE et les directives de l'OMS.

L'OMS ne donne pas de limite pour PM_{2.5} dans la mesure où les enquêtes indiquent des effets sur la santé jusqu'à un niveau d'exposition zéro.

 Table 4: Norme de qualité de l'air, valeurs limites et directive pour PM₁₀.

Effet	Période Moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
Santé	24 heures	260µg/m ³	50µg/m ³⁵	-
Santé	Année Civile	80µg/m ³	40µg/m ³	-

³ Ne doit pas être dépassé plus de 18 fois par année civile. La valeur limite ne sera pas atteinte d'ici janvier 2010.

⁴ La valeur limite ne sera pas atteinte d'ici janvier 2010.

⁵ Ne doit pas être dépassé plus de 35 fois par année.

La Commission européenne ne fixe pas de valeurs limites pour PM_{2,5}, mais la norme fixée par le Ministère de l'Environnement Américain est de 15.0 µg/m³ pour la moyenne annuelle et de 65 µg/m³ pour la valeur moyenne quotidienne.

4.4 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – CO

Le monoxyde de carbone (CO), est un gaz qui se forme lorsque le carbone contenu dans le carburant n'est pas complètement brûlé. La plus grande source d'émission de monoxyde de carbone (CO) est le transport routier, et les concentrations de CO dans l'air ambiant les plus élevées sont observées à proximité du trafic dans les villes où il existe des bouchons. Les normes relatives au CO dans l'air ambiant pour le Sénégal, les valeurs limites de la Communauté Européenne (EU, 2000) et les directives de l'OMS (OMS, 2001) sont présentées dans la Table 6.

Table 5: Norme de qualité de l'air, valeurs limites et directive pour CO.

Effet	Période Moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
Santé	15 minutes			100 mg/m ³
Santé	30 minutes			60 mg/m ³
Santé	1 heure			30 mg/m ³
Santé	8 heures		10 mg/m ³	10 mg/m ³
Santé	24 heures	30 mg/m ³⁶		

4.5 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – VOC (Benzène)

Le benzène est un (dangereux) composé organique volatil (COV) et des valeurs limites de qualité de l'air et des directives pour le benzène ont été établies (EU, 2000). La principale source d'émission de benzène dans l'air au niveau des zones urbaines provient de l'essence, qui contient une certaine quantité de benzène. Les sources d'émission du benzène sont les pots d'échappement des véhicules, et les manipulations de l'essence dans des stations services.

Table 6: Norme de qualité de l'air, valeurs limites et directive pour benzène.

Effet	Période Moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
Santé	Année Civile	-	5 µg/m ³⁷	

⁶ La norme ne devrait pas être dépassée plus d'une fois par année.

⁷ Date à laquelle la valeur limite sera atteinte 1^{er} janvier 2010

4.6 Valeurs limites de la Qualité de l'Air – O₃

L'ozone et d'autres oxydants photochimiques sont formés par l'action sur le dioxyde d'azote (NO₂) des radiations du soleil dans les longueurs d'ondes courtes. En présence de composés organiques volatiles (COV), l'équilibre chimique favorise la formation des plus grandes quantités d'ozone. La valeur limite de la moyenne mobile sur 8 heures (EU, 2002) et la directive (OMS, 2001) pour O₃ visent la protection de la santé humaine.

Table 7: Norme de qualité de l'air, valeurs limites et directive pour O₃.

Effet	Période Moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
Santé	8 heures		120µg/m ³ ⁸	120µg/m ³

4.7 Valeurs limites de la qualité de l'air – oligo-éléments

La combustion de combustibles fossiles, de métaux non ferreux et l'industrie sidérurgique sont les sources anthropogènes les plus importantes pour les oligo-éléments. En raison de leur impact néfaste sur la santé, les valeurs limites, les valeurs cibles et les directives ont été établies pour certains des éléments. (Table 8) (EC, 1999; EC, 2004; OMS, 2001).

Table 8: Norme de qualité de l'air, les valeurs limites et directives pour les oligo-éléments.

Effet	Composant	Période moyenne	Sénégal (normes)	UE (valeurs limites)	OMS (directives)
Santé	Plomb (Pb)	Année civile		0.5 µg/m ³ (**)	
Santé	Arsenic (As)	Année civile (***)		6 ng/m ³ (*)	
Santé	Cadmium (Cd)	Année civile (***)		5 ng/m ³ (*)	5 ng/m ³
Santé	Nickel (Ni)	Année civile (***)		20 ng/m ³ (*)	

* Valeur cible

** Valeur limite

*** Pour le contenu total dans la fraction de PM₁₀ rapporté à une année civile.

⁸ 120 µg/m³ ne doit pas être dépassé sur plus de 25 jours par année civile pour une moyenne sur plus de trois ans.

5 Sites d'échantillonnage dans Dakar

L'objectif général de la sélection des sites d'échantillonnage à Dakar était d'obtenir une vue d'ensemble des niveaux de qualité de l'air à Dakar. C'est sur les résultats de cette étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air que s'appuiera la conception d'un programme permanent de contrôle de la qualité de l'air à Dakar. Les sites d'échantillonnage devraient donc être choisis afin de pouvoir identifier l'impact des différentes sources de pollution de l'air.

Il est courant de classer les sites d'échantillonnage par types de secteur (urbain, périurbain, rural) et selon des sources dominantes de pollution de l'air au lieu de d'échantillonnage (sources liées au trafic, sources industrielles, sources d'environnement de fond). Les sites de trafic pourraient être classifiés selon l'emplacement de l'échantillonneur par rapport au trafic : par exemple bord de route (Road Side, RS) ou rue canyon (Street Canyon, SC). Les zones rurales peuvent être subdivisées selon la distance qui les séparent des principales sources d'émissions et des sources d'émissions surfaciques ; elles sont généralement classifiées en : station de fond proche de la ville, stations régionales et stations de fond éloignées.

Les sites de prélèvement d'échantillons ont été choisis selon les critères mentionnés dans la section 2 et selon les types de secteur et de source d'émissions. Les échantillonneurs ont été placés dans le sens du vent provenant des sources d'émission, dans des zones où on pourrait s'attendre à des impacts. Normalement les échantillonneurs ont été placés le long de traverses perpendiculaires au vent dominant. Le programme d'évaluation de la pollution de l'air a été conçu pour couvrir cinq traverses (Figure 4).

Les échantillonneurs passifs ont été placés sur environ 50 points de mesure en ville et dans le secteur péri-urbain (Figure 4). SO_2 et NO_2 ont été mesurés sur tous les sites, O_3 sur 10 sites et COV sur 8 sites (4 sites par échantillonnage passif et 4 sites par échantillonnage actif).

Un site régional, des secteurs hautement sensibles (trafic et sites industriels) et un site sous le vent venant de la ville ont été choisis pour dresser la carte des niveaux d'Ozone à Dakar. Les sites O_3 ont été choisis pour répondre à trois objectifs principaux : mesurer les niveaux de concentration régionale de fond, identifier la contribution de O_3 à la génération de NO_2 dans la ville, et évaluer la génération de O_3 provoquée par des réactions chimiques avec les COV, NO_x , etc dans la zone urbaine.

Les sites de COV ont été choisis pour évaluer la contribution de sources potentielles simples (raffineries et réservoirs d'hydrocarbure) et le trafic. Divers points sensibles du trafic ont été choisis pour mesurer les niveaux de COV liés au activités de transport.

Une station permanente a été établie dans le centre ville pour faire une mesure plus étendue du niveau de qualité de l'air à Dakar. Elle a été placée sur un balcon situé au premier étage, à environ 5 m au-dessus du sol, dans une rue 'canyon' à forte fréquentation du centre ville. Sur un tel site on s'attend à un niveau de concentration

représentatif du niveau d'exposition auquel les personnes sont soumises dans le centre ville de Dakar.

L'échantillonnage séquentiel de particules suspendues (PM_{10} et $PM_{2,5}$), le contrôle de CO et l'échantillonnage passif de NO_2 , SO_2 , O_3 et COV ont été effectués sur ce site.

L'échantillonnage de PM et le contrôle de CO ont été réalisés du début du mois d'octobre au début du mois de janvier. L'échantillonnage de NO_2 et SO_2 , a été effectué en octobre, l'échantillonnage de O_3 en janvier 2006 et l'échantillonnage de COV au cours des deux premières semaines du mois d'octobre.

Les sites et les micro environnements choisis sont décrits dans l'Annexe A et une carte montrant les emplacements des sites est présentée en Figure 4.

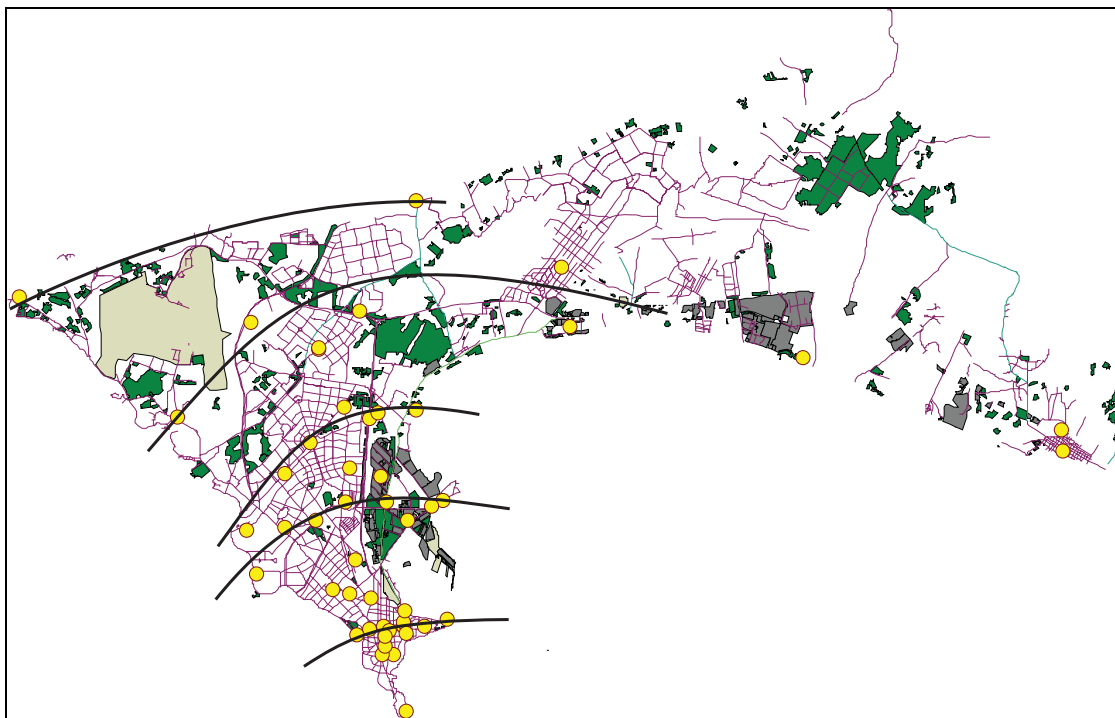


Figure 4: *Distribution géographique des sites d'échantillonnage dans la zone urbaine et périurbaine de Dakar.*

En plus du programme d'échantillonnage présenté ci-dessus, des mesures de courte durée de PM_{10} , COV et CO ont été effectuées en parallèle dans des secteurs spécifiques de la ville entre le 3 et le 7 octobre 2005. Un des objectifs était d'identifier les concentrations de fond et les points sensibles potentiels.

6 Concentrations mesurées

C'est en se basant sur l'hypothèse que les moyennes mensuelles sont représentatives des moyennes à long terme (section 2.2), que les concentrations moyennes mensuelles de SO₂ et NO₂ ont été collectées et comparées aux standards annuels et aux valeurs limites.

Les moyennes mobiles de CO sur 8 heures ont été calculées sur la base des concentrations horaires mesurées et comparées aux valeurs limites sur 8 heures. Les valeurs de PM₁₀ mesurées sur 24 heures ont été comparées aux normes et directives journalières sur la qualité de l'air. Les concentrations journalières de benzène ont été évaluées par rapport à des valeurs limites annuelles, en supposant que les conditions de dispersion pendant la période de collecte de données sont représentatives des moyennes à long terme.

6.1 Echantillonnage NO₂

Les échantillonneurs passifs ont été analysés à NILU. Les niveaux de concentration de NO₂ sont présentés dans la Figure 5 et la distribution géographique est présentée dans la Figure 6.

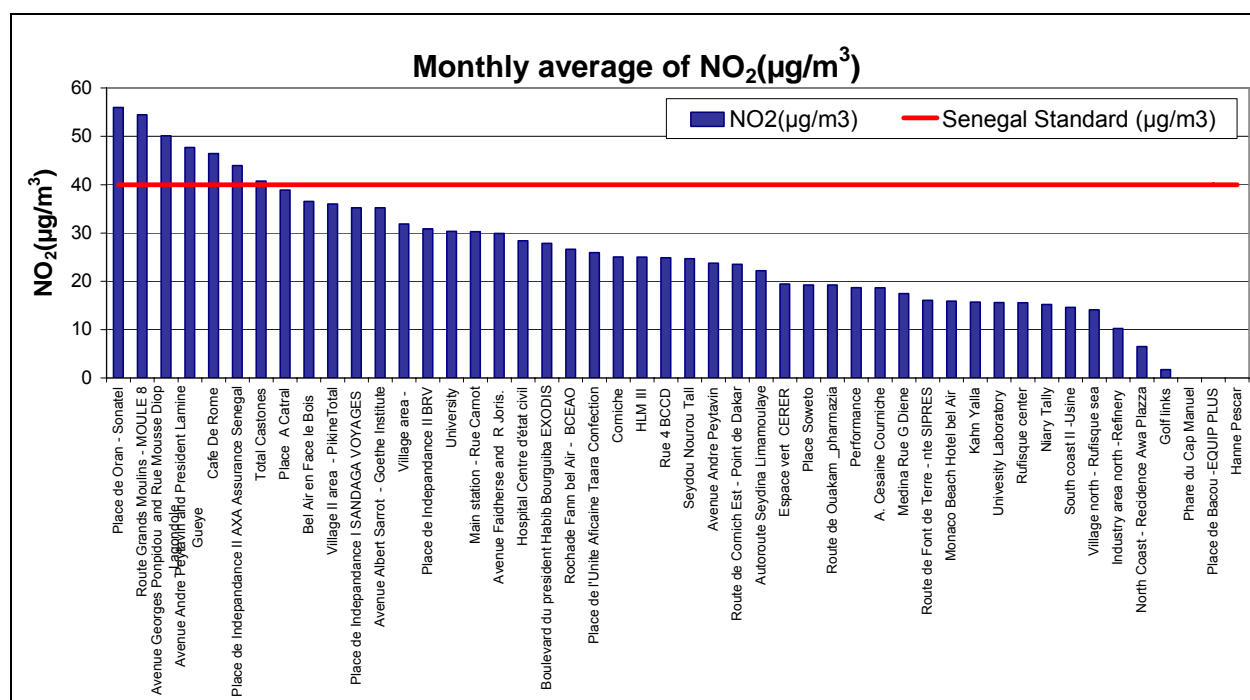


Figure 5: Concentrations de NO₂ mesurées avec des échantillonneurs passifs en octobre 2005.

La norme annuelle de NO₂ pour le Sénégal et la valeur limite de l'UE sont toutes deux de 40 µg/m³. Cette valeur de seuil est définie pour protéger la santé humaine. Les moyennes mensuelles dépassent la norme NO₂ annuelle sur sept sites. La

concentration maximale et moyennes des échantillons étaient respectivement de $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tous les dépassements de la norme ont été relevés sur des sites de trafic et dans la rue 'canyon'.

Les sources d'émission, qui sont principalement le trafic, seront plus ou moins constantes au cours de l'année. En supposant que les conditions météorologiques pendant la période de campagne soient représentatives d'une moyenne à long terme, on s'attend à ce que les dépassements soient permanents toute l'année dans les zones sensibles du trafic.

Les concentrations NO_2 mesurées en juin lors d'une étude préliminaire de l'état de la pollution de l'air (Guerreiro et al., 2005a) sont approximativement aux mêmes niveaux que les concentrations mesurées en octobre. La différence des niveaux de concentration entre ces deux périodes, mesurés sur quelques sites, peut être due aux variations du micro-environnement local d'une période de mesure à l'autre.

Des niveaux de concentration semblables ont été mesurés pendant une campagne de mesure réalisée en 2004 (Ndiaye S.A., 2005, communication personnelle). Sur la base des moyennes mensuelles, on s'attend à ce que les valeurs limites horaires soient dépassées dans des zones sensibles du trafic.

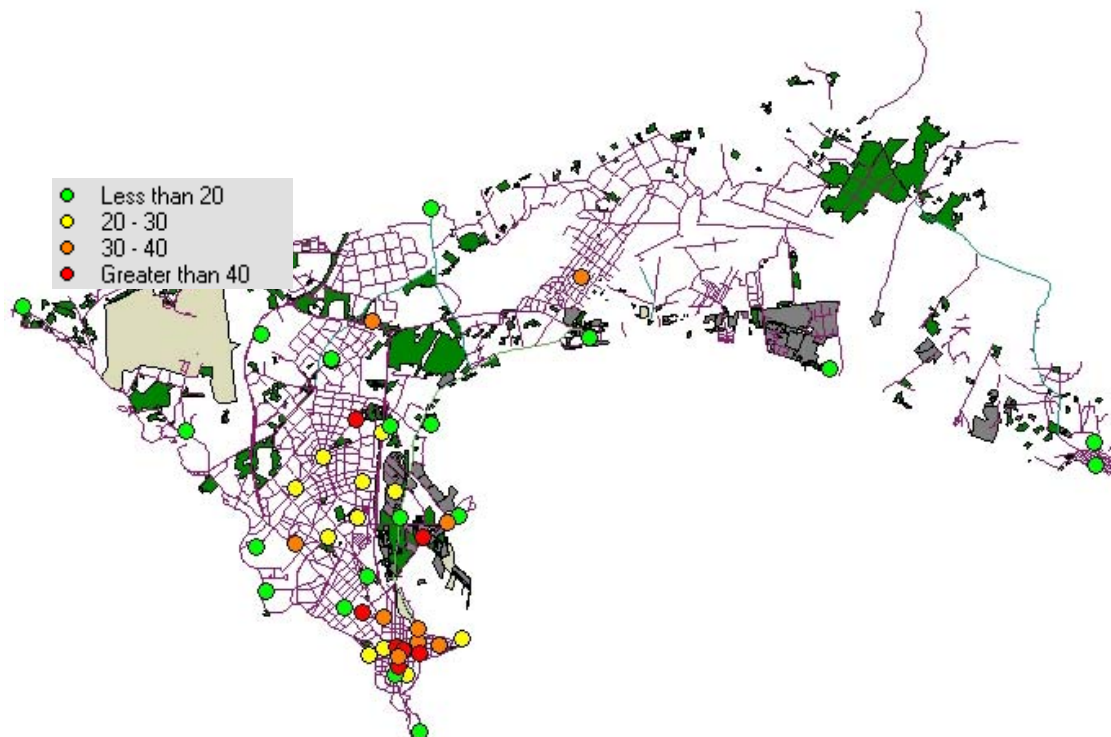


Figure 6: Distribution Géographique des concentrations de NO_2 mesurées par échantillonnage passif en octobre 2005.

6.2 Echantillonnage SO₂

Les échantillonneurs passifs de SO₂ ont été analysés au laboratoire de NILU. Les niveaux de concentration SO₂ mensuels sont présentés dans la Figure 7. Une carte montrant la distribution géographique est présentée dans la Figure 8.

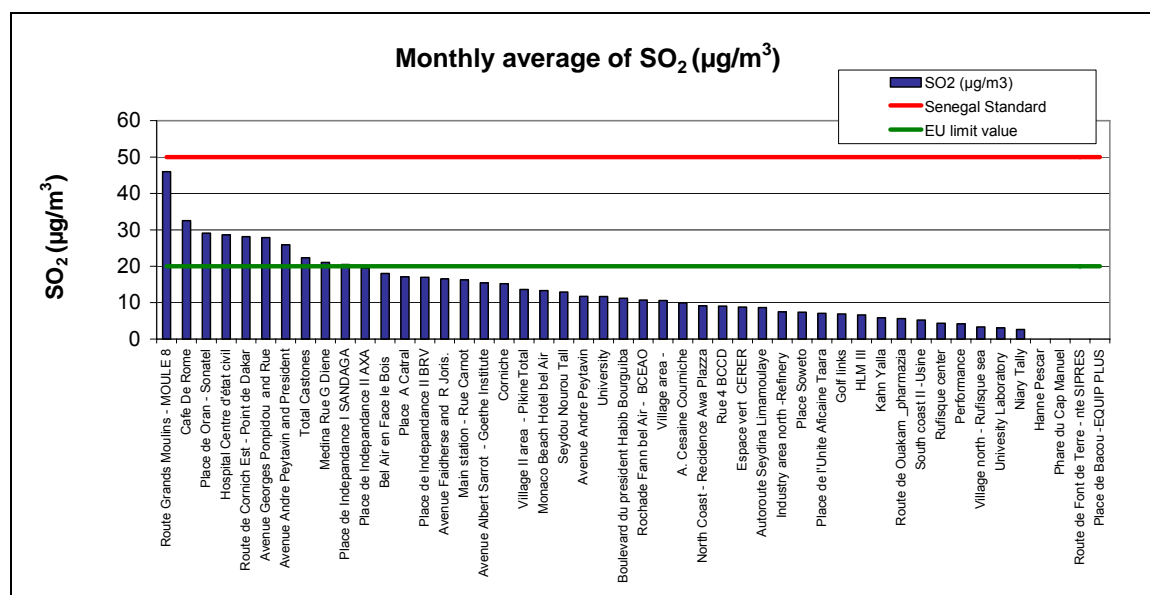


Figure 7: Concentrations de SO₂ mesurées par échantillonnage passif en octobre 2005.

La norme annuelle de SO₂ pour le Sénégal et la valeur limite de l'OMS sont fixées à 50 µg/m³. Cette directive vise à protéger la santé humaine.

En supposant que les moyennes mensuelles soient représentatives des moyennes à long terme, les concentrations de SO₂ sont comparées à la norme annuelle et aux valeurs annuelles. Les moyennes mensuelles de SO₂ n'ont dépassé ni norme du Sénégal ni la directive de l'OMS (50 µg/m³). Des dépassements de la valeur limite de fixée par l'UE pour la protection des écosystèmes (20 µg/m³) ont été relevés aussi bien sur les sites industriels que sur les sites de trafic (Figure 7, Figure 8).

La concentration maximum de SO₂ (46 µg/m³) a été mesurée sur la route des Grands Moulins, dans le secteur industriel. Le niveau de concentration moyen était de 13 µg/m³.

La comparaison de ces résultats avec ceux de l'évaluation préliminaire de la qualité de l'air effectuée en juin 2005 (Guerreiro et al., 2005a) et ceux d'une campagne de mesure réalisée en 2004 (Ndiaye S.A., 2005, communication personnelle) indiquent des niveaux de SO₂ approximativement identiques.

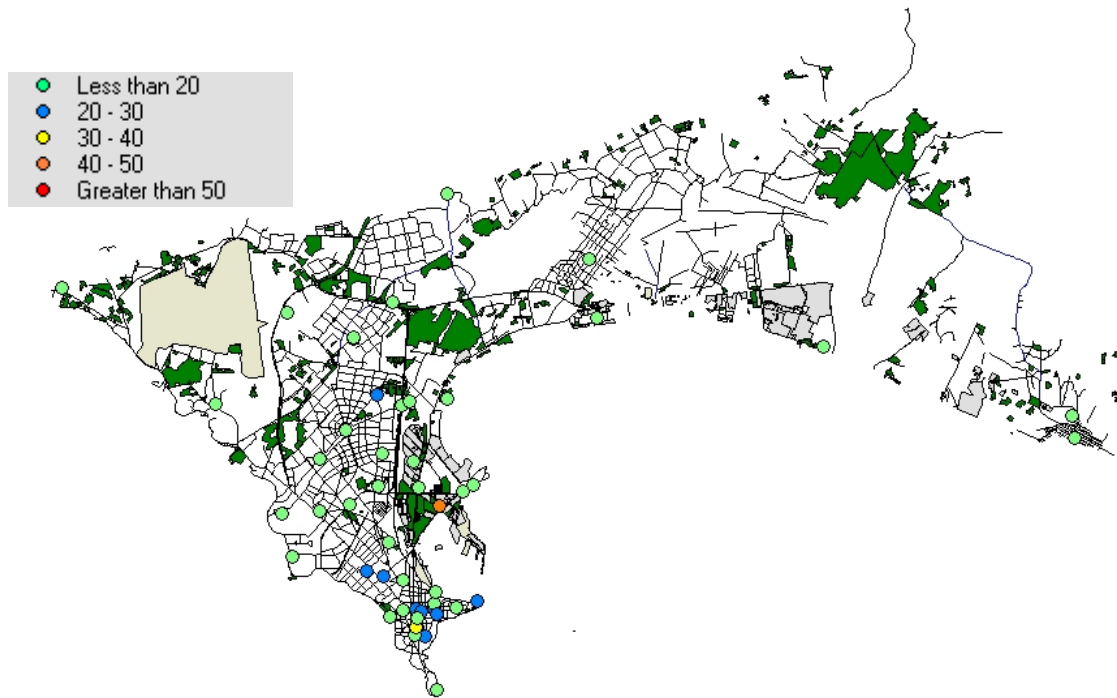


Figure 8: *Distribution Géographique des concentrations de SO₂ mesurées par échantillonnage passif en octobre 2005.*

6.3 Echantillonnage O₃

L'ozone présent au niveau du sol (O₃) n'est pas émis directement dans l'atmosphère, mais c'est un polluant secondaire produit par la réaction entre le dioxyde d'azote (NO₂), les hydrocarbures et la lumière du soleil. À cause du temps requis par les réactions chimiques, l'ozone a tendance à se former sous le vent par rapport aux sources de pollution.

L'oxyde d'azote (NO), cependant, détruit l'ozone pour former du dioxyde d'azote (NO₂). C'est pour cette raison que les niveaux d'ozone ne sont pas aussi élevés dans les zones urbaines, où des niveaux élevés de NO sont émis par les véhicules et les autres sources d'émission, que dans des zones rurales.

Les concentrations moyennes d'Ozone mesurées sur deux semaines sur 9 sites de Dakar sont présentées en Figure 9.

Les concentrations moyennes d'O₃ les plus élevées dépassent 60 µg/m³ au niveau des sites régionaux de fond. Les concentrations O₃ les plus basses sont mesurées dans des secteurs à fort trafic, près de l'autoroute et dans le centre ville. Le ratio entre la concentration d'O₃ mesurée au niveau du site régional et celle mesurée dans les secteurs de trafic dense est de 3,8. Cela indique que les sources d'émissions locales de NO consomment une grande quantité d'O₃ régional pour produire du NO₂.

La formation d'O₃ se fera principalement dans le sens du vent en provenance de la zone urbaine, à une échelle régionale, à cause du temps de réaction chimique.

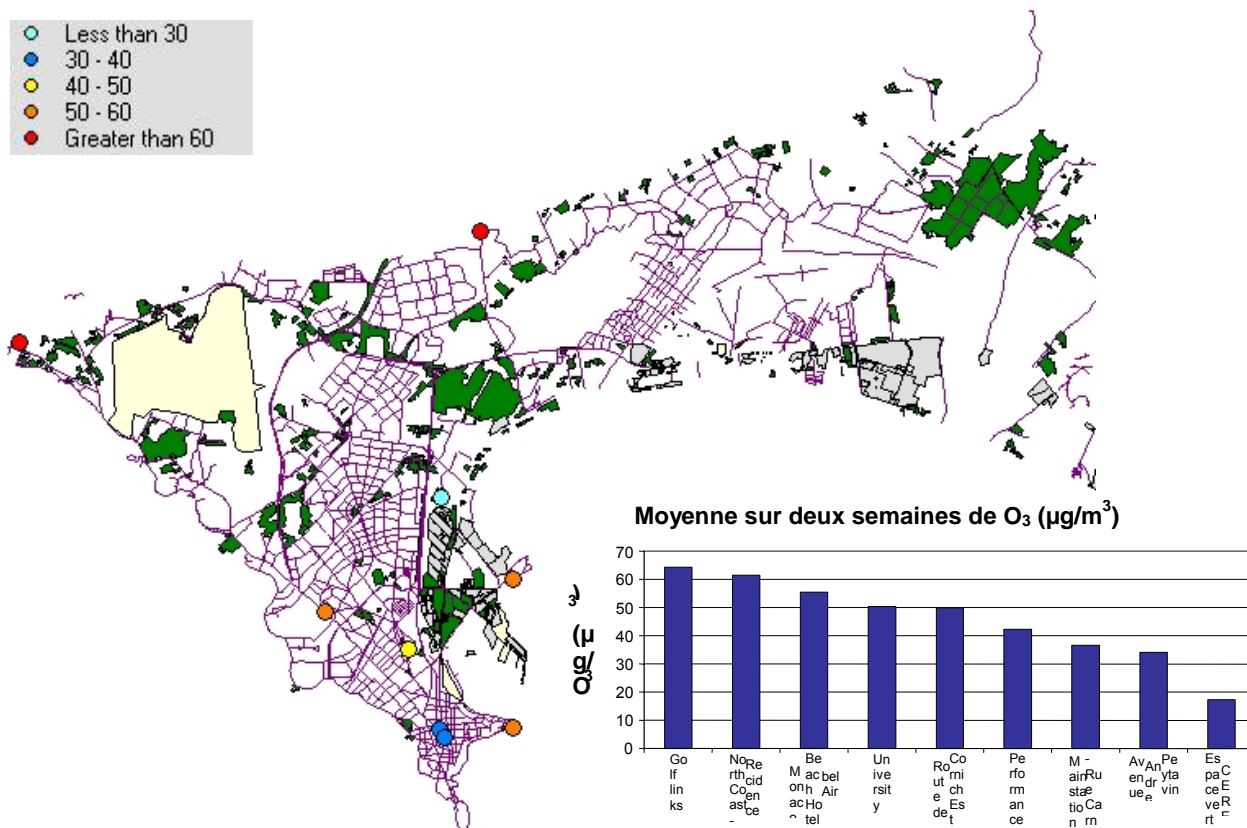


Figure 9: Concentrations d'O₃ mesurées par échantillonnage passif en janvier 2006.

6.4 Contrôle CO

La principale source de la concentration ambiante de CO est le trafic. On pourrait s'attendre à de hautes concentrations de CO dans les rues 'canyon' lors des embouteillages. Les situations de hautes concentrations de CO sont souvent liées au trafic aux heures de pointe, et la génération de CO est maximale lorsque les voitures sont au ralenti. Le site choisi pour mesurer le CO est donc une rue 'canyon'.

Il est important de se rappeler que les mesures ont été effectuées à environ 5 mètres au-dessus du sol : à cette hauteur le CO émis par le trafic s'est déjà bien mélangé à l'air. Les concentrations de CO proches de la source sont plus élevées, et les personnes qui restent ou marchent sur le trottoir sont exposées à des niveaux de concentration de CO bien supérieurs à ceux mesurés à 5 m au-dessus du sol.

Les moyennes mobiles de CO sur 8 heures ont été calculées et comparées aux valeurs limites de l'UE et à la directive de l'OMS. Les concentrations de CO mesurées à la rue Carnot ne dépassaient ni la valeur limite de l'UE, ni les directives de l'OMS, ni la norme journalière de CO du Sénégal qui est de 30 mg/m³.

Le calcul de variation diurne de CO a indiqué que la concentration la plus élevée est observée pendant les heures de pointe. Le maximum horaire est en-dessous de la valeur limite et de la directive.

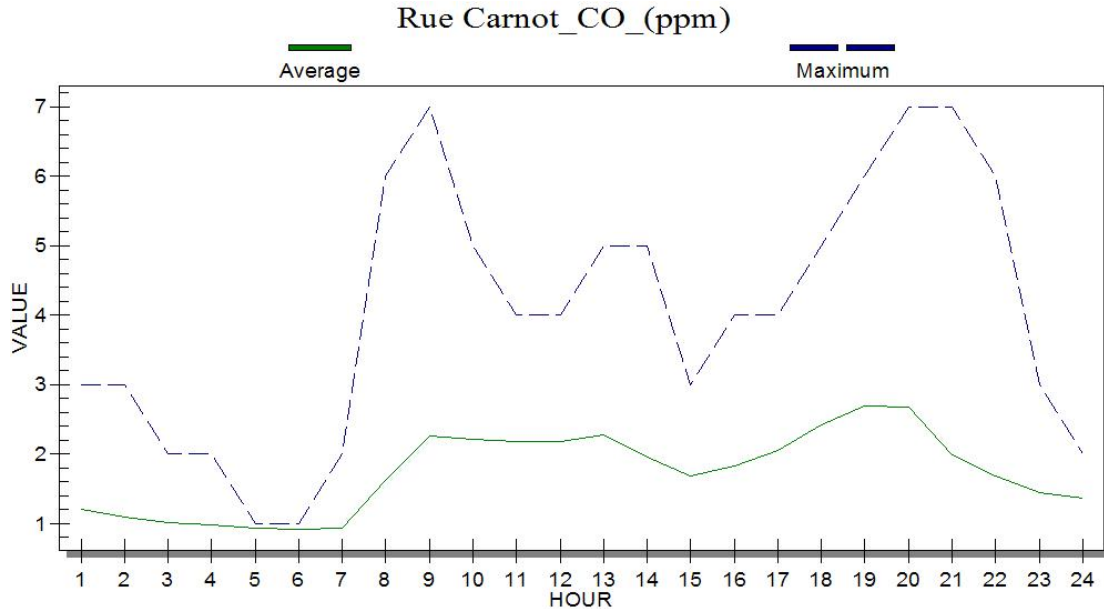


Figure 10: Variation diurne de CO (moyenne et maximum) mesurée à la Rue Carnot en octobre incluant décembre 2005.

Quelques mesures de CO de courtes durées effectuées à Dakar pendant une mission de terrain en octobre 2005 montrent que les concentrations sont comprises entre 3 et 27 mg/m³.

Les concentrations les plus élevées ont été mesurées le long de rues à forte fréquentation lors des embouteillages. Les concentrations moyennes sur une minute mesurées le long de deux rues de Dakar sont présentées en Figure 11.

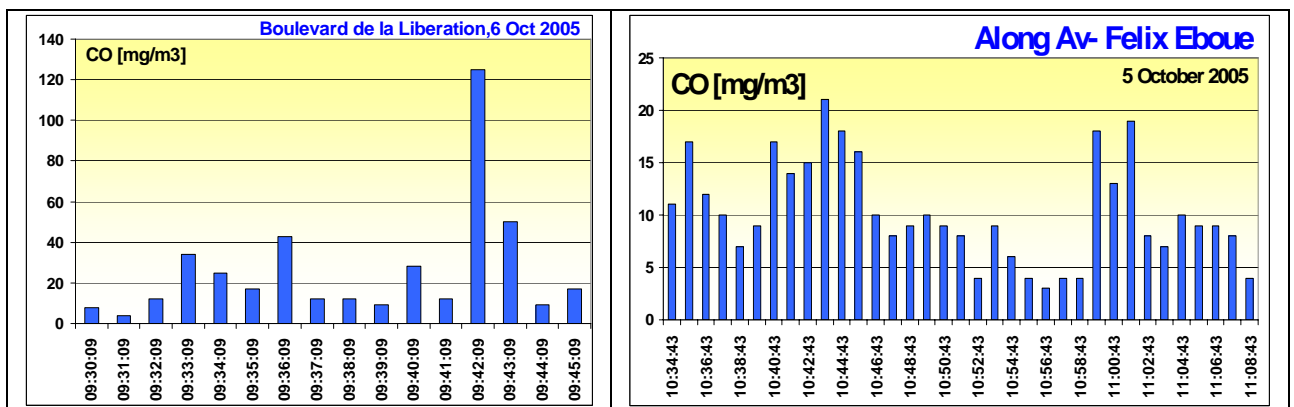


Figure 11: Concentrations moyennes de CO (mg/m³) sur une minute mesurées le long de deux rues le 5 et 6 octobre 2005.

Les concentrations de CO sur une minute ont dans quelques cas atteint plus de 120 mg/m³. Ces mesures de courte durée ont indiqué que les valeurs limites de CO pourraient être dépassées dans certains secteurs sensibles situés près des routes.

6.5 Composés Organiques Volatils (COV)

L'échantillonnage de COV a été effectué sur 8 sites pour évaluer les contributions des potentielles sources industrielles et des points sensibles du trafic. 4 échantillons ont été collectés par échantillonnage passif (échantillonnage par diffusion), et sur 4 sites l'échantillonnage actif (échantillonnage par pompe) a été utilisé. Les tubes d'adsorption ont été exposés pendant 3-7 jours en échantillonnage passif et environ 1 heure en échantillonnage actif.

6.5.1 Composés Organiques Volatils Totaux (COVT)

Les concentrations en Composés Organiques Volatils Totaux (COVT) varient entre 31 µg/m³ et 359 µg/m³ (Figure 12). Les concentrations les plus élevées ont été mesurées sur des sites industriels (raffinerie et route des Grands Moulins) (Figure 12). La nature des COV est cependant différente d'un site à l'autre : aux Grands Moulins les COV liés au trafic dominant (par exemple le benzène), tandis qu'au niveau de la raffinerie ce sont les COV liés aux activités industrielles qui dominent.

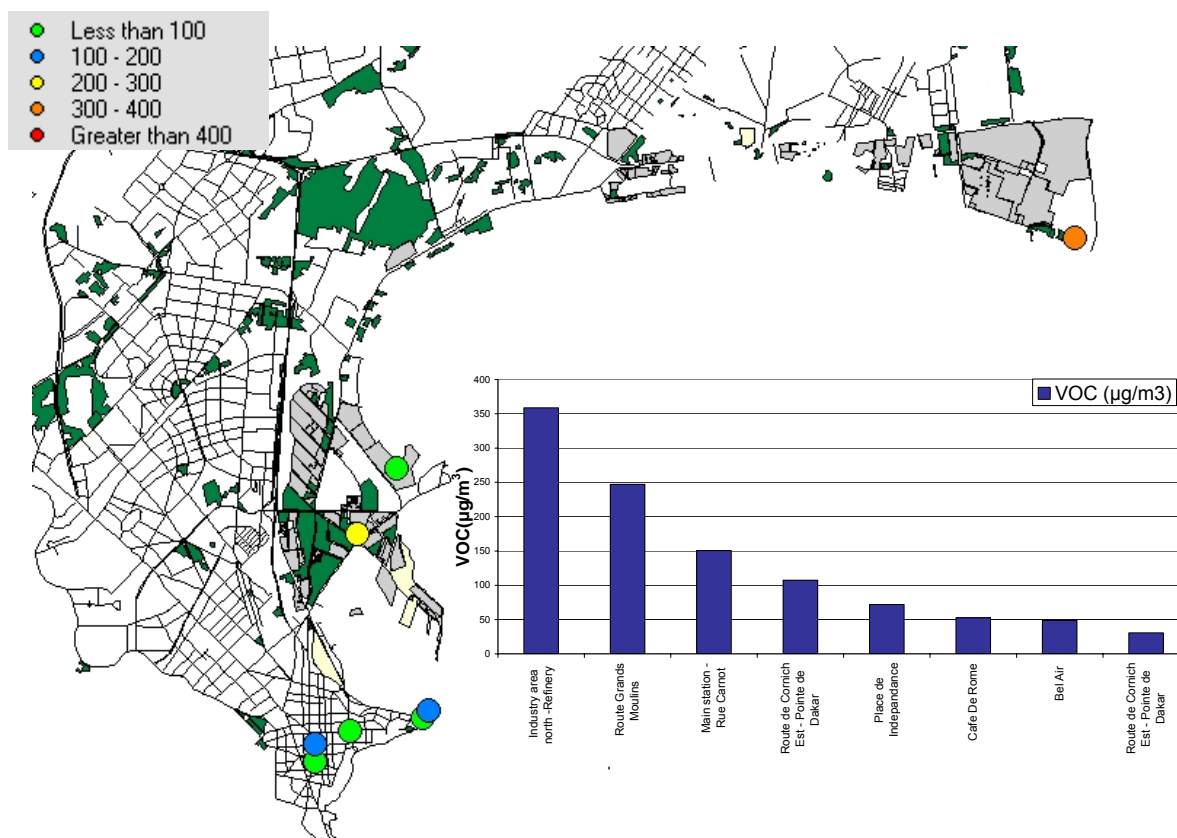


Figure 12: Concentrations de COV (µg/m³) mesurées par échantillonnage actif et passif en octobre 2005.

6.5.2 Benzène

Les concentrations de benzène mesurées ont été comparées à la valeur limite annuelle. En trois endroits (tous des sites de trafic) la valeur limite annuelle de l'UE ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a été dépassée (Figure 13). La plus haute valeur mesurée (sur la route des Grands Moulins) était de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui représente 4 fois la valeur limite annuelle.

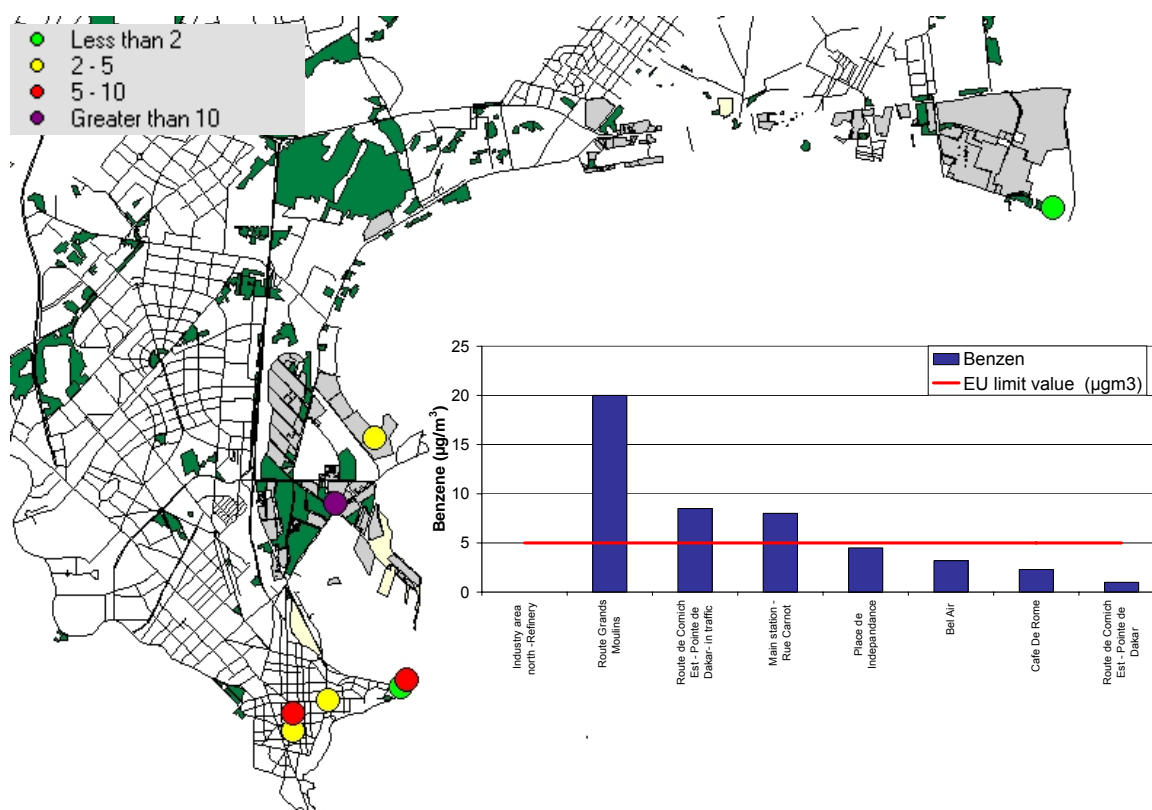


Figure 13: Concentrations de benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mesurées par échantillonnage actif et passif en octobre 2005.

6.6 Les Particules Fines

Les valeurs journalières des particules suspendues (PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$) ont été mesurées dans une rue à forte fréquentation dans le centre ville en utilisant un échantillonneur gravimétrique séquentiel. PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ n'ont pas été mesurés simultanément, mais à des périodes différentes. De plus, des valeurs de PM_{10} sur de courtes durées (moyennes sur 10-minutes) ont été mesurées dans des secteurs industriels, des sites de trafic et les secteurs régionaux de fond de la ville, du 3 au 7 octobre 2005, en utilisant un moniteur d'aérosol portatif.

6.6.1 PM_{10}

Les concentrations quotidiennes de PM_{10} mesurées à la rue Carnot pendant la période de prélèvement ont une seule fois dépassé la norme fixée par le Sénégal. Cependant, la valeur limite fixée par l'Union Européenne a été dépassée chaque jour durant la

période de prélèvement. Les valeurs de PM_{10} relevées varient entre 52 et $338 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une valeur moyenne de $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

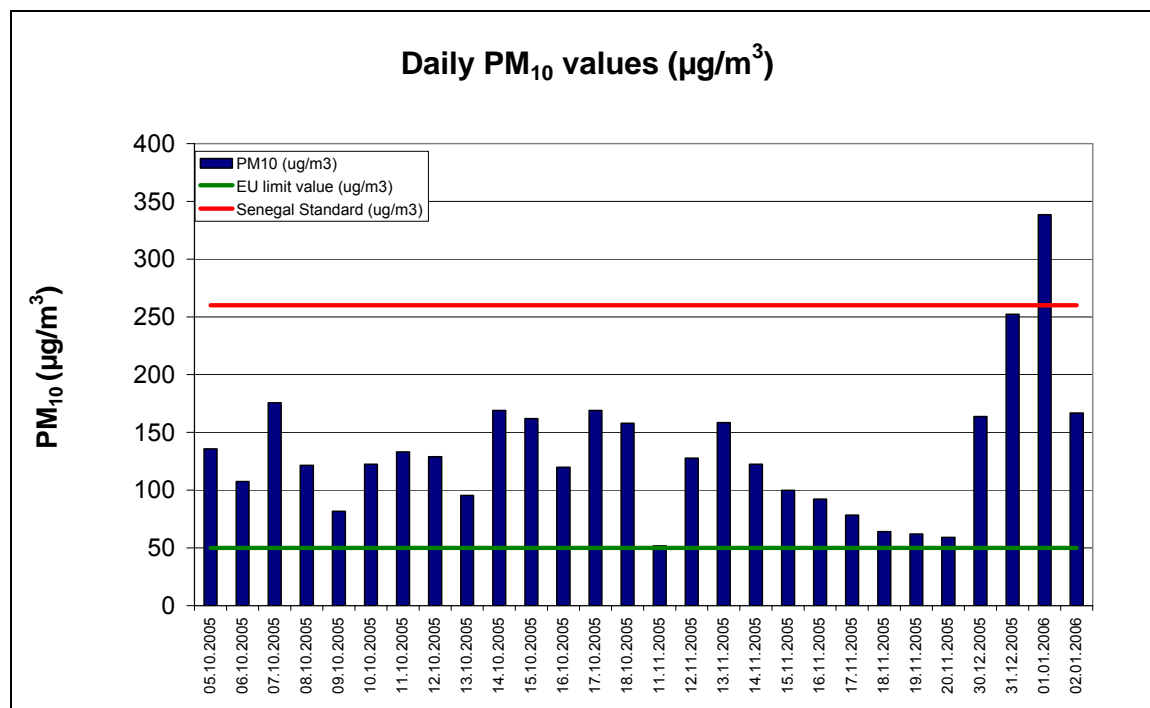


Figure 14: Concentrations journalières de PM_{10} mesurées rue Carnot avec un échantillonneur séquentiel d'octobre 2005 à janvier 2006.

Les mesures de courtes durées des concentrations de PM_{10} dans diverses zones de la ville ont donné des valeurs comprises entre 160 et $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 15). La concentration la plus élevée sur 10 minutes était supérieure à $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; elle a été mesurée sur le trottoir sous le vent d'une rue à forte fréquentation.

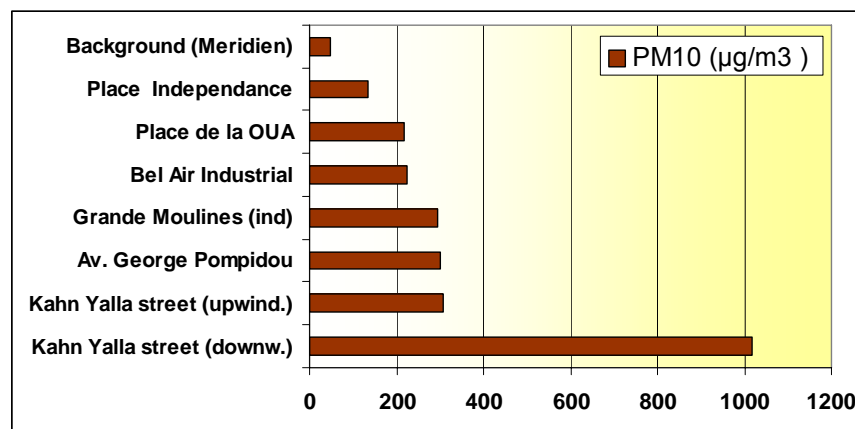


Figure 15: Concentrations moyennes (sur des périodes diverses d'échantillonnage) de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mesurées sur différents sites à Dakar du 4 au 6 octobre 2005.

De hautes concentrations ont généralement été mesurées dans les secteurs industriels de Dakar. Ainsi :

- On a mesuré une concentration moyenne sur 50 minutes de $388 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tout près des Grand Moulins.
- Dans le secteur de Bel Air les moyennes sur 10 minutes de PM_{10} se sont étendues de 200 à $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sur deux sites de trafic, Avenue Georges Pompidou et à la Rue 4, BCCD, les moyennes sur 10 minutes de PM_{10} étaient respectivement de $301 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les mesures effectuées à la fois au vent et sous le vent dans une des rues principales de Khar Yallah ont révélé des moyennes sur 10 minutes élevées : la concentration de PM_{10} était de $308 \mu\text{g}/\text{m}^3$ du côté de la rue situé au vent, et de $1017 \mu\text{g}/\text{m}^3$ du côté de la rue situé sous le vent.

Les concentrations urbaines de fond ont été évaluées par des mesures de PM_{10} au milieu de l'espace vert de la Place de l'Indépendance, et des mesures de nuit au deuxième étage de l'hôtel du Café de Rome (centre ville de Dakar, Boulevard de la République). Les concentrations sur dix minutes le matin à la Place de l'Indépendance variaient entre 120 et $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et les concentrations nocturnes au Café de Rome variaient entre 20 et $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Des mesures de PM_{10} ont aussi été effectuées sur des sites régionaux de fond (Hôtel Méridien et secteur de Yoff). Les concentrations observées, d'environ $40\text{-}60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sont étrangement élevées et indiquent que l'air de fond se déplaçant du nord-est vers Dakar avait une charge naturelle assez élevée de particules.

Les mesures moyennes quotidiennes effectuées Rue Carnot ainsi que les moyennes des mesures de courtes durées effectuées dans divers micro-environnements indiquent des valeurs élevées de PM_{10} . On s'attend donc à ce que les concentrations de PM_{10} dans les zones urbaines de Dakar dépassent les valeurs limites internationales. Les moyennes sur de courtes durées, dans des zones sensibles, étaient généralement comprises entre 100 et $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et les moyennes quotidiennes de PM_{10} à la station principale ont toutes dépassé la valeur limite de l'UE ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre octobre et janvier.

Ces résultats indiquent que le niveau de PM_{10} dans les zones sensibles de Dakar peut être assez élevé pour engendrer des problèmes de santé.

6.6.2 $\text{PM}_{2.5}$

Les mesures quotidiennes de $\text{PM}_{2.5}$ ont révélé des concentrations variant entre $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une valeur moyenne de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cela est inférieur à la norme journalière pour $\text{PM}_{2.5}$, fixée par l'US-EPA ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$). L'OMS ne fournit pas de limite pour $\text{PM}_{2.5}$ dans la mesure où les enquêtes indiquent des effets sur la santé jusqu'au niveau d'exposition zéro.

En moyenne $\text{PM}_{2.5}$ représente environ 1/3 du niveau de PM_{10} , ce qui signifie que les émissions de particules totales sont essentiellement constituées de PM_{10} .

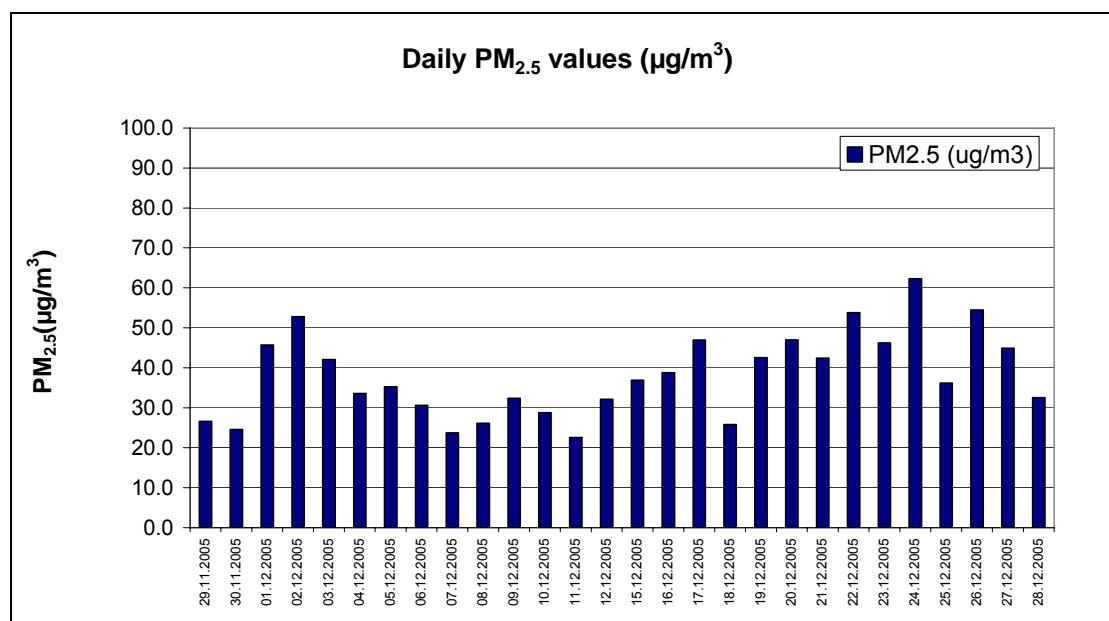


Figure 16: Concentrations journalières de PM_{2.5} mesurées rue Carnot avec un échantillonneur séquentiel en novembre-décembre 2005.

6.6.3 Polluants inorganiques

L'analyse des éléments inorganiques a été effectuée sur 8 filtres (4 filtres PM₁₀ et 4 filtres PM_{2.5}) avec un ICP-MS (spectromètre de masse quadripolaire à source plasma) (NILU, 2006).

Ces filtres ont été sélectionnés d'une part en fonction de leur poids (les filtres contenant le plus de particules ont été analysés) et d'autre part pour couvrir toute la période de mesure (un filtre par semaine sur toute la période de mesure) en vue d'une analyse des tendances.

Le calcul des concentrations moyennes permet d'évaluer la contribution des oligo-éléments aux concentrations moyennes de PM et de relever les éventuels dépassements de normes. Les concentrations moyennes pour 6 oligo-éléments sur les 10 analysés (les plus toxiques, plus l'aluminium) sont présentées dans la Figure 17 pour les filtres de PM₁₀ et dans Figure 18 pour les filtres de PM_{2.5}: plomb (Pb), cadmium (Cd), vanadium (V), arsenic (As) et aluminium (Al).

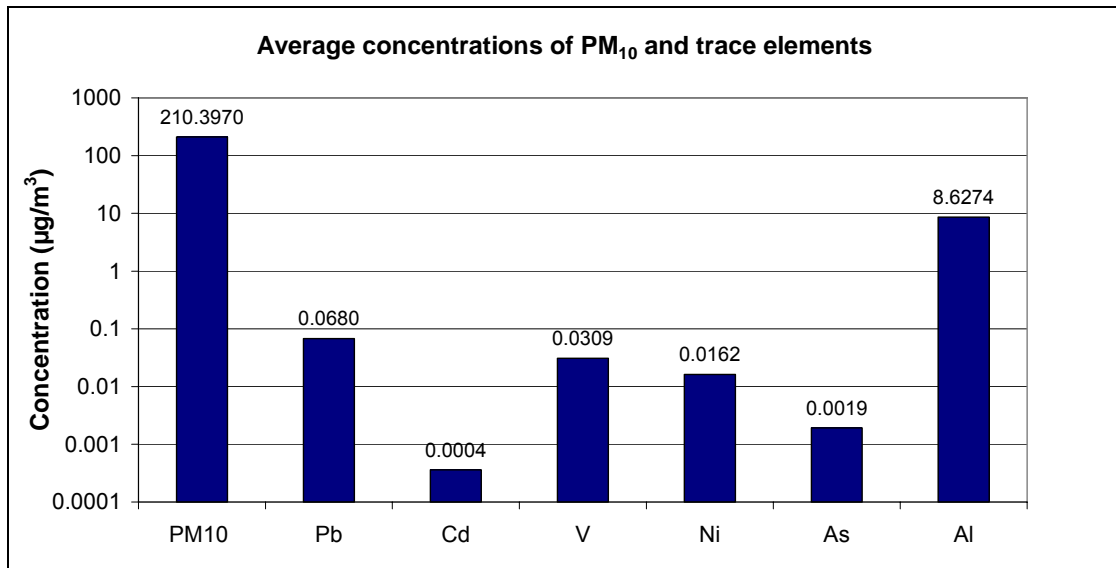


Figure 17: Concentration moyennes de PM₁₀ et de 6 oligo-éléments pour quatre filtres analysés.

L'analyse n'a pas révélé de dépassements des valeurs limites de l'UE (EU, 2000; EU, 2001) ni des directives de l'OMS pour aucun des éléments évalués (Annexe B). Aussi bien pour le plomb (Pb) que le cadmium (Cd) la concentration moyenne des filtres analysés étaient très inférieure à la limite annuelle et des valeurs cibles, respectives. La concentration moyenne mesurée pour l'arsenic (As) correspondait approximativement à 1/3 de la valeur limite de l'UE. Pour le nickel (Ni) cependant, la concentration moyenne correspondait au 4/5 de la valeur cible de l'UE.

Le pourcentage moyen des 10 oligo-éléments analysés sur les filtres PM₁₀ est de 4%. L'aluminium, qui est un composant important des poussières minérales, en est l'élément dominant (Figure 17). Si on ne prend pas en compte l'aluminium, les oligo-éléments représentent seulement 1 pour mille de la concentration de PM₁₀ mesurée.

En ce qui concerne les filtres de PM_{2.5}, les oligo-éléments représentent 2 % de la masse des particules et l'aluminium y est le principal composant déposé. (Figure 18).

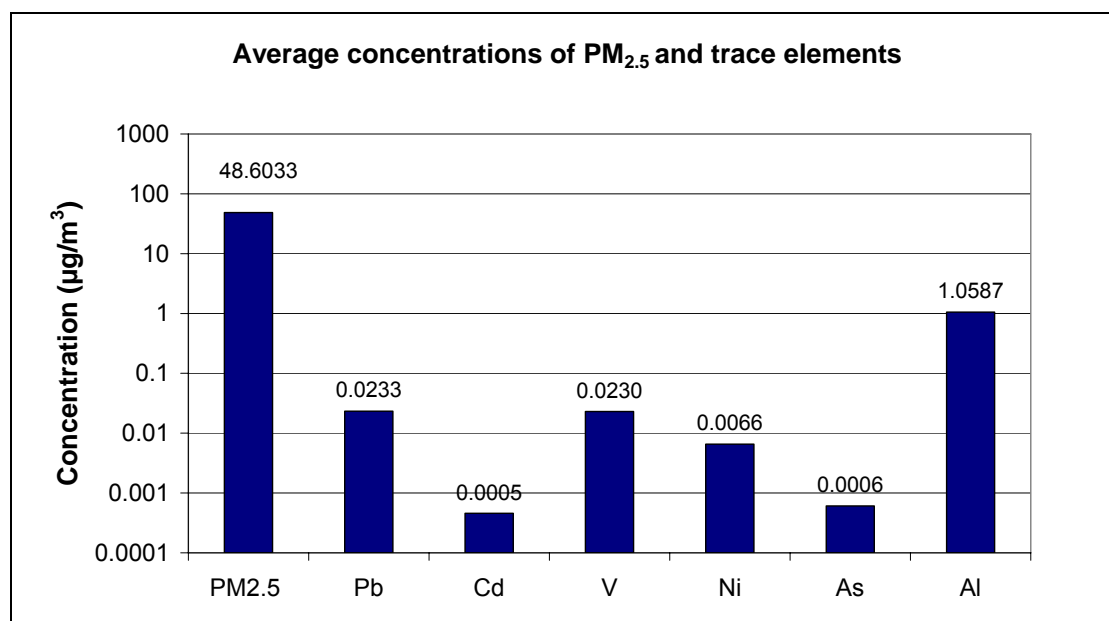


Figure 18: Concentration moyennes de PM_{2.5} et de 6 oligo-éléments inorganiques pour quatre filtres analysés.

Aucune tendance significative n'a été observée en ce qui concerne les concentrations en plomb. Elles sont faibles, ce qui indique qu'au moment de l'étude il n'y avait pratiquement plus de plomb dans l'essence utilisée par les véhicules.

6.6.4 Matières Carbonées Totales (TCM)

Les filtres de PM₁₀ et de PM_{2.5} sélections ont aussi été analysés pour identifier le contenu des particules fines en carbone élémentaire (EC) et en carbone organique (OC). L'analyse du carbone élémentaire et organique fait appel à des méthodes thermo-optiques. La teneur en matières carbonées totales (TCM) a été évaluée sur la base de l'analyse EC/OC.

La teneur en TCM des filtres PM₁₀ était comprise entre 7 % et 23 % de la masse totale, avec une moyenne de 17 % (Table 9).

Table 9: Pourcentages de matière carbonée totale (TCM) de PM₁₀ et PM_{2.5}.

Date	TCM des filtres PM ₁₀ (%)	Date	TCM des filtres PM _{2.5} (%)
07/10/2005	17	02/12/2005	39
17/10/2005	20	09/12/2005	68
13/11/2005	23	17/12/2005	76
01/01/2006	7	24/12/2005	54

La concentration moyenne en TCM des filtres PM_{2.5} était de 59 %, avec un maximum de 76 %.

Les rapports EC/TC étaient en moyenne de 35.7 % pour PM₁₀ et 30.4 % pour PM_{2.5}.

La bibliographie (Seinfeld et Pandis, 1998) indique un rapport EC/TC compris entre 28 % et 38 % dans des secteurs où la source dominante est constituée d'un mélange d'émissions par des voitures essence et des voitures diesel. Les rapports EC/TC calculés correspondent à ces références et on peut en conclure que les émissions de la circulation automobile constituent probablement la source dominante de matière carbonée dans PM.

Le contenu de TCM et le rapport EC/TC des échantillons PM_{2.5} indiquent que les principaux éléments dans PM_{2.5} provenaient de sources de combustion.

6.6.5 Composants hydrosolubles

En raison de la proximité de l'Océan Atlantique et des sources anthropogènes, on s'attend à ce que le sel marin et d'autres composants hydrosolubles contribuent aux concentrations de PM à Dakar. Les filtres de PM₁₀ et de PM_{2.5} ont été analysés en utilisant la chromatographie par échange d'ions pour identifier les teneurs en sodium (Na), potassium (K), magnésium (Mg), calcium (Ca), nitrate (NO₃), sulfate (SO₄), ammonium (NH₄) et chlorure (Cl) (Annexe C).

Table 10: Pourcentages des composants hydrosolubles de PM₁₀ et PM_{2.5}.

Date	Composants hydrosolubles des filtres PM ₁₀ (%)	Date	Composants hydrosolubles des filtres PM _{2.5} (%)
07/10/2005	24.1	02/12/2005	13.4
17/10/2005	19.2	09/12/2005	19.1
13/11/2005	15.6	17/12/2005	13.5
01/01/2006	11.3	24/12/2005	12.2

La teneur en composants hydrosolubles était en moyenne de 18 % pour PM₁₀ et 15 % pour PM_{2.5}, ce qui indique qu'une partie substantielle des particules de PM à Dakar est hydrosoluble.

En moyenne la contribution du nitrate, du sulfate et de l'ammonium est de 4.7 % pour PM₁₀. Ces composants proviennent principalement de sources anthropogènes (Annexe C). Les 12.9 % de PM₁₀ sont constitués de sodium, potassium, magnésium, calcium et chlorure qui proviennent principalement de sources naturelles (Annexe C).

Pour PM_{2.5}, la contribution des deux sources anthropogènes et naturelles est de 7.3 %.

Ces résultats indiquent que les composants hydrosolubles de sources naturelles contribuent plus à PM₁₀ que les sources anthropogènes. Cependant les composants hydrosolubles de sources anthropogènes contribuent autant que les sources naturelles dans PM_{2.5}.

6.6.6 Résumé de l'analyse chimique de concentrations de PM

Les contributions au total des concentrations de PM mesurées ont été calculées en se basant sur l'analyse des oligo-éléments, l'analyse de la matière carbonée élémentaire et organique ainsi que l'analyse des composants hydrosolubles.

Pour les filtres PM₁₀ la contribution des composants analysés représentait entre 24 % et 44 % du PM₁₀ total (Figure 19) .

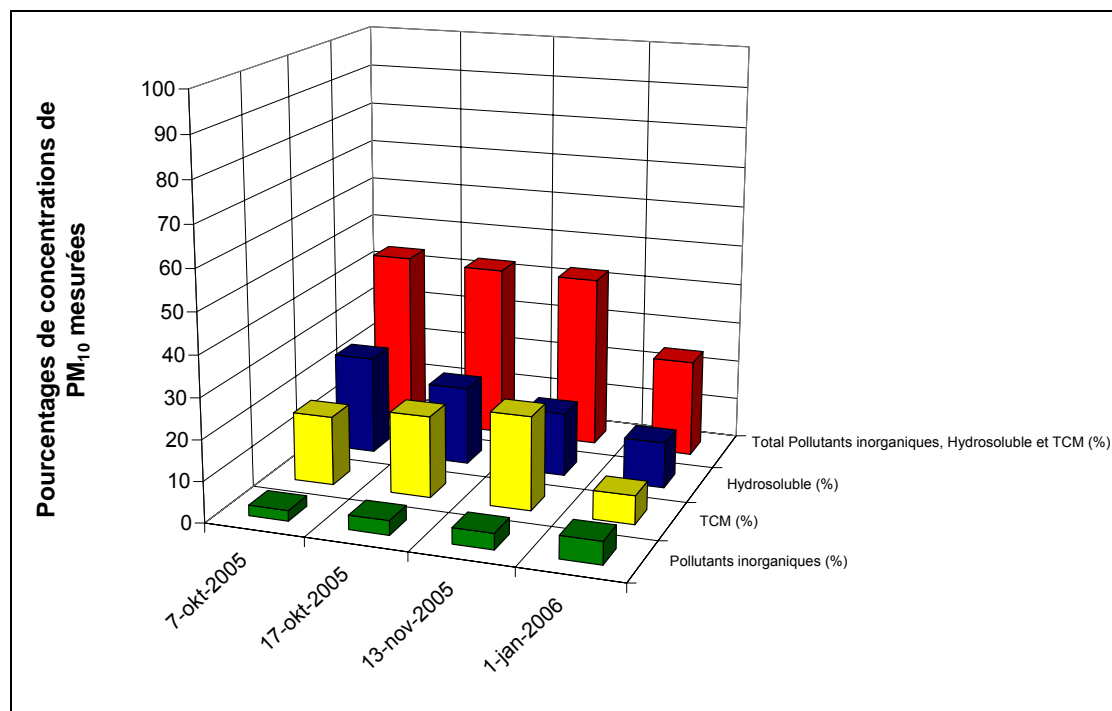


Figure 19: Pourcentage de polluants inorganiques, de composants hydrosolubles et de matières carbonées totales (TCM) dans les concentrations en PM₁₀ mesurées.

Pour PM₁₀, les composants hydrosolubles et TCM contribuent chacun approximativement à 20 % des niveaux moyens de PM₁₀. Les analyses effectuées ne mesurent que les teneurs en aluminium (Al) de la poussière minérale. Les autres composants importants des poussières minérales comme le silicium (Si) et le calcium (Ca) non-hydrosoluble n'ont pas été analysés. Sur la base des résultats on suppose qu'une grande partie de la fraction grossière (PM₁₀ – PM_{2.5}) des concentrations de PM₁₀ était constituée de poussière de sol.

Pour PM_{2.5}, cependant, la contribution totale des oligo-éléments, des TCM et des composants hydrosolubles aux concentrations observées est comprise entre 57 et 91 % (Figure 20), avec une moyenne de 76 %. TCM constitue le principal composant de PM_{2.5}, et correspond en moyenne à 59 % du total des concentrations de PM_{2.5}. Les composés hydrosolubles contribuent approximativement à 15 % du total des concentrations de PM_{2.5}. Cela indique qu'une grande quantité de PM_{2.5} a pour origine des sources de combustion.

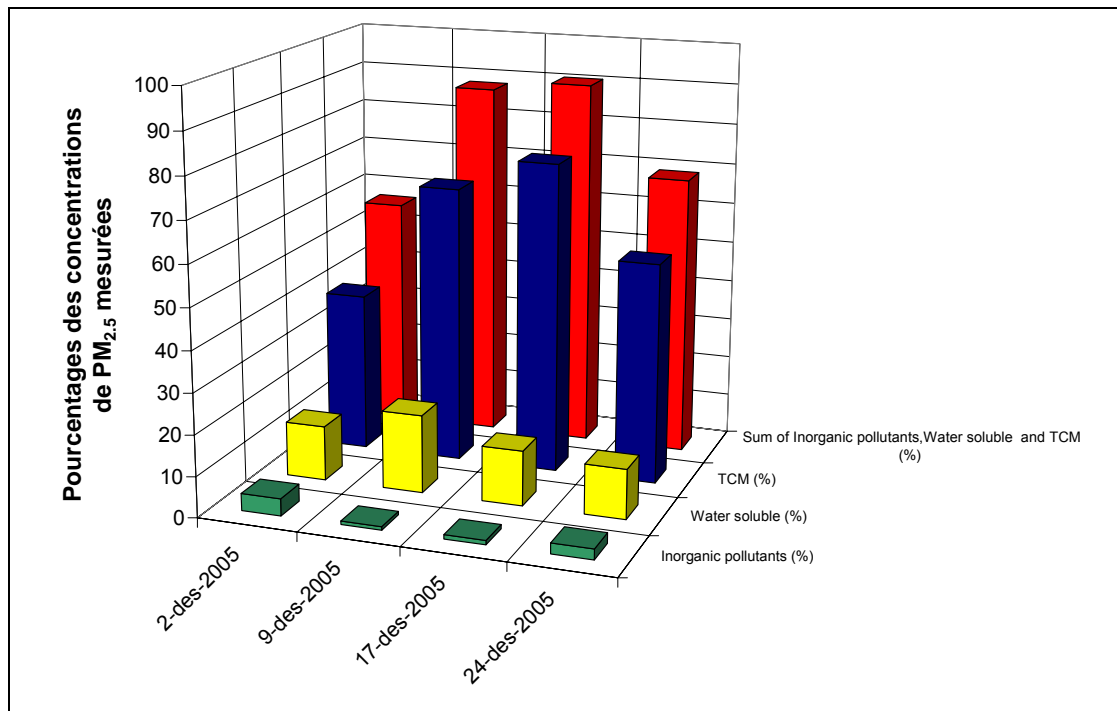


Figure 20: Pourcentage de polluants inorganiques, de matières hydrosolubles, et de matières carbonées totales (TCM) dans les concentrations de PM_{2.5} mesurées.

7 Discussion et conclusion

Les résultats de cette étude indiquent que la pollution atmosphérique à Dakar semble être liée principalement au trafic et dans certains cas aux industries. Le principal problème de la pollution atmosphérique à Dakar est celui des particules suspendues. Les moyennes de PM₁₀ mesurées sur 24 heures sont 2 à 7 fois supérieures aux standard internationaux, et les valeurs limites ont été dépassées chaque jour pendant la période d'échantillonnage. Les moyennes de PM₁₀ sur de courtes durées (10 minutes à 1 heure) dans des secteurs sensibles sont généralement comprises entre 100 et 300 µg/m³, ce qui signifie que les concentrations de PM₁₀ dans ces secteurs dépassent certainement les valeurs limites internationales.

Les niveaux de PM_{2.5} étaient aussi relativement élevés comparés aux niveaux de concentration observés dans d'autres zones urbaines de par le monde. La concentration moyenne de PM_{2.5} sur les 4 semaines de la période d'échantillonnage s'élève à 38 µg/m³. Une grande fraction de PM_{2.5} est de type carbonique ce qui indique que PM_{2.5} provient principalement de sources de combustion.

L'analyse des teneurs en plomb (Pb), cadmium (Cd), vanadium (V), nickel (Ni) et arsenic (As) n'a fait ressortir aucun dépassement des valeurs limites et valeurs cibles de l'UE, ni des directives de l'OMS. Les 10 oligo-éléments analysés représentaient respectivement en moyenne 4 % et 2 % des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5}.

L'aluminium, qui est un composant important des poussières minérales, était l'élément dominant.

L'analyse de la part des matières carbonées totales (TCM) dans les concentrations de PM_{10} et $PM_{2.5}$ relevées à la station permanente dans le centre ville indique que:

- La teneur en poussière du sol est élevée dans PM_{10} , surtout pour la fraction des particules ayant des diamètres compris entre 2,5 et 10 μm ;
- Les principales sources de $PM_{2.5}$ sont des sources de combustion

L'analyse des composants hydrosolubles montre que la contribution anthropogène est importante, particulièrement pour $PM_{2.5}$.

La concentration maximale de NO_2 mesurée était de 56 $\mu g/m^3$ et la concentration moyenne pour tous les sites était de 27 $\mu g/m^3$. En prenant comme hypothèse que les conditions météorologiques pendant la période de mesures étaient représentatives d'une moyenne à long terme, des dépassements de la norme annuelle ont été observés sur 7 sites de trafic.

Les concentrations moyennes mensuelles de SO_2 ne dépassaient pas la directive de l'OMS ni la norme du Sénégal pour les moyennes annuelles. Les concentrations de SO_2 semblent être relativement faibles dans la ville, sauf dans les secteurs industriels. Cependant l'étude préliminaire d'évaluation de l'état de la pollution de l'air, effectuée en juin, avait indiqué que les valeurs limites pourraient de temps en temps être dépassées dans le centre ville de Dakar.

Les valeurs horaires de CO mesurées d'octobre à décembre 2005 dans une rue canyon à environ 5 mètres au-dessus du sol n'indiquent aucun dépassement des valeurs limites ni des normes. Cependant des mesures de courtes durées de CO à environ 1 mètre au-dessus du sol, ont montré des concentrations élevées dans les embouteillages.

La valeur limite annuelle de benzène pour l'UE (5 $\mu g/m^3$) a été dépassée sur 3 des 8 sites examinés. La valeur mesurée la plus élevée était de 20 $\mu g/m^3$, ce qui représente 4 fois la valeur limite annuelle.

Cette étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air sera utilisée comme référence principale pour la conception du programme permanent de contrôle de pollution atmosphérique à Dakar.

8 Références

EU (1999) Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. *Official Journal of the European Union*, L 163, 29/06/1999, 41-60.

EU (2000) Directive 2000/69/EC of the European Parliament and of the Council of 16 November 2000 relating to limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air. *Official Journal of the European Union*, L 313, 13/12/2000, 12-21.

- EU (2002) Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air. *Official Journal of the European Union*, L 067, 09/03/2002, 14-30.
- EU (2005) Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. *Official Journal of the European Union*, L 23, 26/01/2005, 3-16.
- Guerreiro, C., Laupsa, H. and Sivertsen, B. (2005a) Passive sampling of SO₂ and NO₂ in ambient air in Dakar. Preliminary study, June 2005. Kjeller (NILU OR 46/2005).
- Guerreiro, C., Sivertsen, B. and Laupsa, H. (2005b) QADAK Mission 1, May-June 2005. Kjeller (NILU OR 45/2005).
- IVL (2006) Diffusive samplers for air monitoring.
URL: http://www.ivl.se/en/business/monitoring/diffusive_samplers.asp
[29.03.2006].
- Ndiaye, S.A. (2005) Personal communication during the meeting at E.S.P. Dep. Physique Atmosphérique 2 June 2005 (QADAK Mission 1 report, NILU OR 45/2005).
- NILU (2006) Heavy metals. URL:
www.nilu.no/index.cfm?ac=topics&folder_id=4429&text_id=12628&view=text&lan_id=3 [15.02.2006].
- Norme Sénégalaise NS 05-062 (2003) Pollution atmosphérique - Norme de rejets, Direction de l'Environnement et des Etablissements classés. Octobre 2003.
- OMS – World Health Organization (2000) Air quality guidelines for Europe. 2nd. ed. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe (WHO Regional Publ., European Series, 91).
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (1998) Atmospheric chemistry and physics. New York, John Wiley & Sons.
- TSI (2003) Model 8520 DustTrak aerosol monitor operation and service manual. 1980198 Revision N. Shoreview, MN 55126, USA.

Annexe A

Classification des sites sélectionnés et des composants à mesurer



Table 11: Classifications des sites sélectionnés et composants mesurés pour l'évaluation de l'état de la pollution de l'air dans les secteurs urbain et péri-urbain de Dakar.

ID	Site/name	Area types	Sources	Component measured			
				SO2	NO2	O3	VOC (passive)
1	Hospital Centre d'état civil	U	T	X	X		
2	Place Soweto	U	T	X	X	X	
3	Cafe De Rome	U	T-SC	X	X		X
4	Avenue Andre Peytavin	U	T	X	X		
5	Avenue Andre Peytavin and President Lamine Gueye	U	T	X	X		
6	Phare du Cap Manuel	R	B	X	X	X	
7	Place de Independance I SANDAGA VOYAGES	U	T	X	X		
8	Place de Independance II BRV	U	T	X	X		
9	Place de Independance II AXA Assurance Senegal	U	T	X	X		
10	Avenue Albert Sarrot - Goethe Institute	U	T	X	X		
11	Route de Cornich Est - Pointe de Dakar	R	I/B	X	X	X	X
12	Avenue Faidherse and R Joris.	U	T	X	X		
13	Place A Catral	U	T	X	X		
14	Place de Oran - Sonatel	U	T	X	X		
15	Medina Rue G Diene	SU	T/B	X	X		
16	Performance	SU	B	X	X	X	
17	University	SU/U	T-RC	X	X	X	
18	Seydou Nourou Tall	SU	T	X	X		
19	Rochade Fann bel Air - BCEAO	U	T	X	X	X	
20	Place de Bacou -EQUIP PLUS	U	I	X	X		
21	Route Grands Moulins - MOULE 8	U	I	X	X	X	
22	Boulevard du president Habib Bourguiba EXODIS	SU	T	X	X		
23	Place de l'Unite Africaine Taara Confection	SU	B	X	X		
24	Autoroute Seydina Limamoulaye	SU	B	X	X		
25	Espace vert CERER	U	B	X	X	X	
26	Route de Ouakam _pharmazia	SU	B	X	X	X	
27	Route de Font de Terre - nte SIPRES	R	B-NCA	X	X		
28	Meridien Golf court	R	B- REG	X	X	X	
29	North Coast - Residence Awa Piazza	R	B- REG	X	X	X	
30	South coast II -Usine	SU	I	X	X		
31	Industry area north -Refinery	SU	I	X	X	X	X
32	Village north - Rufisque sea	U	B	X	X	X	
33	Avenue Georges Pompidou and Rue Mousse Diop - Lagondole	U	SC	X	X		
34	Village area -	U	T	X	X	X	
35	Village II area - PikineTotal	U	T	X	X		
36	Main station - Rue Carnot	U	SC	X	X	X	X
37	A. Cesaine Courniche	SU	B	X	X	X	
38	HLM III	SU	B	X	X		
39	Rue 4 BCCD	SU	I	X	X		
40	Total Castones	U	T	X	X		
41	Corniche	U	B	X	X		
42	Rufisque center	SU	B	X	X		
43	Hanne Pescar	SU	I	X	X	X	
44	Monaco Beach Hotel bel Air	U	I	X	X	X	
45	Bel Air en Face le Bois	U	I	X	X		
46	Niary Tally	SU	B	X	X	X	
47	Kahn Yalla	SU	T	X	X	X	
48	Univesity Laboratory	SU	B	X	X		
49	Hotel de Rome 3 etg	U	B	X			

Abréviations: urbain (U), Péri-urbain (SU), rural (R)(Régional=REG, NCA=Proximité zone urbaine), trafic (T), rue canyon(SC) bord de route (RS)), industriel (I), environnement de fond (B)



Annexe B

Analyse des métaux



Table 12: Concentration et pourcentage de métaux analysés dans PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Pourcentage	Concentration PM_{10}	Somme métaux	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	V	As	Al
	%	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)
07.10.2005	2.6	175.66	4527.47	70.66	0.27	35.60	107.31	33.37	27.04	2.22	19.09	1.32	4230.60
17.10.2005	3.5	169.00	5950.84	70.68	0.33	22.37	74.65	19.96	12.94	2.72	33.78	1.71	5711.70
13.11.2005	3.9	158.46	6223.63	55.62	0.58	27.12	74.14	14.13	9.98	2.78	25.70	1.28	6012.30
01.01.2006	5.6	338.47	18816.82	75.20	0.26	31.83	58.20	27.48	14.88	5.48	45.09	3.40	18555.00
Moyenne	3.9	210.40	8879.69	68.04	0.36	29.23	78.58	23.74	16.21	3.30	30.92	1.93	8627.40

Table 13: Concentration et pourcentage de métaux analysés dans $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	Pourcentage	Concentration $PM_{2.5}$	Somme métaux	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	V	As	Al
	%	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)	(ng/m ³)
02.12.2005	4.2	52.78	2230.23	12.11	0.28	5.15	23.62		3.93	0.68	13.97	0.69	2169.80
09.12.2005	0.9	32.37	276.58	10.83	0.20	3.07	19.03		8.52	0.34	26.99	0.50	207.10
17.12.2005	1.0	46.94	485.19	19.80	0.32	6.54	25.06		5.61	0.37	18.84	0.56	408.10
24.12.2005	2.6	62.32	1604.35	50.55	1.03	17.46	43.84		8.23	0.71	32.14	0.70	1449.70
Moyenne	2.2	48.60	1149.09	23.32	0.46	8.06	27.89		6.57	0.52	22.99	0.61	1058.68



Annexe C

Analyses des composants hydrosolubles



Table 14: Concentration et pourcentage de composants hydrosolubles dans PM₁₀.

	PM10	Cl	Na	K	Mg	Ca	NO3	SO4	NH4	Sum natural sources	Sum anthropogenic sources	Total water soluble	Percentage natural sources	Percentage anthropogenic	Percentage water soluble
										Cl,Na,K,Ca and Mg	NO3,SO4, NH4		Cl,Na,K,Ca and Mg	NO3,SO4, NH4	
	(µg/m3)	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	%	%	%
07.10.2005	175.7	6.27	5.25	0.55	0.88	14.88	3.31	10.95	0.31	27.8	14.6	42.4	15.8	8.3	24.1
17.10.2005	169.0	6.93	5.19	0.49	0.82	11.91	2.64	4.44	0.07	25.3	7.2	32.5	15.0	4.2	19.2
13.11.2005	158.5	5.26	3.84	0.62	0.59	9.44	1.29	3.44	0.24	19.7	5.0	24.7	12.5	3.1	15.6
01.01.2006	338.5	5.66	3.61	2.30	0.93	15.46	1.51	8.58	0.26	28.0	10.4	38.3	8.3	3.1	11.3
Average	210.4	6.03	4.47	0.99	0.80	12.92	2.19	6.85	0.22	25.2	9.3	34.5	12.9	4.7	17.6

Table 15: Concentration et pourcentage de composants hydrosolubles dans PM_{2.5}.

	PM2.5	Cl	Na	K	Mg	Ca	NO3	SO4	NH4	Sum natural sources	Sum anthropogenic sources	Total water soluble	Percentage natural sources	Percentage anthropogenic	Percentage water soluble
										Cl,Na,K,Ca and Mg	NO3,SO4, NH4		Cl,Na,K,Ca and Mg	NO3,SO4, NH4	
	(µg/m3)	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m3	%	%	%
02.12.2005	52.8	1.03	1.27	0.32	0.17	1.85	0.58	1.72	0.13	4.6	2.4	7.1	8.8	4.6	13.4
09.12.2005	32.4	0.32	1.03	0.25	0.10	1.04	0.58	2.50	0.37	2.7	3.5	6.2	8.5	10.7	19.1
17.12.2005	46.9	0.09	0.83	0.33	0.09	1.26	0.71	2.72	0.30	2.6	3.7	6.3	5.5	7.9	13.5
24.12.2005	62.3	0.77	0.75	0.73	0.12	1.58	0.55	2.83	0.27	4.0	3.6	7.6	6.3	5.9	12.2
Average	48.6	0.55	0.97	0.41	0.12	1.43	0.60	2.44	0.27	3.5	3.3	6.8	7.3	7.3	14.6



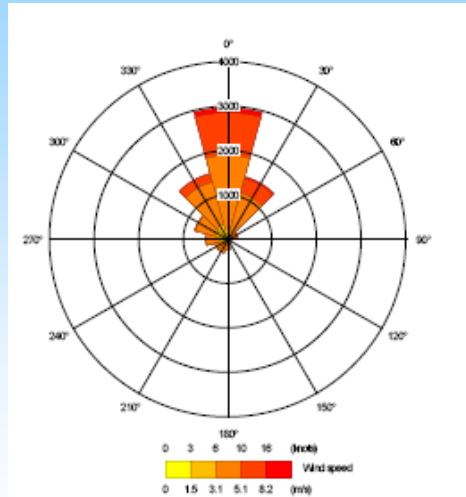
Annexe D

Rose des vents Dakar (1997-2001)



Rose des Vents

Dakar (1997-2001)



L'évaluation s'est basée sur des données météorologiques relevées à Dakar toutes les heures pendant cinq ans par le cabinet de consultants Trinity. Les données portent sur les années 1997 à 2001. Dakar est le lieu le plus proche qui soit représentatif des conditions météorologiques rencontrées sur le site de la future implantation. La rose indique que le vent dominant vient du nord.



BSWILUAQMS DakaMarch2006ppt

www.NILU.no





Norwegian Institute for Air Research (NILU)

P.O. Box 100, N-2027 Kjeller, Norway

REPORT SERIES SCIENTIFIC REPORT	REPORT NO. OR 58/2006	ISBN 82-425-1783-5 ISSN 0807-7207	
DATE	SIGN.	NO. OF PAGES 47	PRICE NOK 150,-
TITLE Etude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air à Dakar 2005 Octobre - Décembre 2005 et Janvier 2006.		PROJECT LEADER Cristina Guerreiro	
		NILU PROJECT NO. O-105010 OR 58/2006	
AUTHOR(S) Bjarne Sivertsen, Herdis Laupsa et Cristina Guerreiro		CLASSIFICATION * A	
		CONTRACT REF. No 003/C/FND/05	
REPORT PREPARED FOR CETUD Route de Front de Terre, B.P. 17 265 Dakar–Liberté, Sénégal			
ABSTRACT Une étude d'évaluation de l'état de la pollution de l'air a Dakar a été effectuée entre Octobre 2005 et Janvier 2006. Les échantillonneurs passifs de NO ₂ , SO ₂ , COV et O ₃ ont été placés sur environ 50 sites de mesure choisis dans la ville de Dakar et dans des zones de banlieues environnantes. Un échantillonneur séquentiel de particules suspendues (PM ₁₀ et PM _{2,5}), ainsi qu'un moniteur de CO ont été placés dans une rue à forte fréquentation dans le centre ville. En plus du programme d'échantillonnage présenté ci-dessus, des mesures de courte durée de PM10, COV et CO ont été réalisées en parallèle dans des secteurs de la ville spécialement ciblés. L'objectif principal était de collecter l'information de base nécessaire à la conception d'un programme de suivi permanent de la qualité de l'air de la région.			
NORWEGIAN TITLE			
KEYWORDS Air quality monitoring	Air quality assessment	Senegal	
ABSTRACT (in Norwegian)			

* Classification A Unclassified (can be ordered from NILU)
 B Restricted distribution
 C Classified (not to be distributed)