

LISTE DES ABBREVIATIONS

ADEME	: Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFTU	: Association pour le Financement des Transports Urbains
ANSD	: Agence Nationale de Statistique et de Démographie
BPCO	: Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive
CETUD	: Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar
CMM	: Charge Mondiale de Morbidité
CO	: Monoxyde de carbone
CO₂	: Dioxyde de carbone
COV_s	: Composés organiques volatiles
HAP_s	: Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HbCO	: Carboxyhémoglobine
H₂S	: Hydrogène sulfuré
NH₃	: Ammoniac
N₂O	: Oxyde de diazote
NO	: Monoxyde d'azote
NO₂	: Dioxyde d'azote
OCDE	: Organisation de coopération et de développement économique
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PM	: Particule Moléculaire
Ppm	: Partie par million
Ppb	: Partie par billion

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Lignes directrices de l’OMS relatives à la qualité de l’air.....	25
Tableau II: Directives européennes des valeurs limites et des seuils d’alertes (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	27
Tableau III: Les valeurs limites d’Immissions (tableau modifié du code de l’environnement du Sénégal)	29
Tableau IV: Lignes sélectionnées en fonction du garage et de la destination...	33
Tableau V: Durées moyennes des trajets sur chaque ligne.....	41
Tableau VI: Nombre d’évènements rencontrés par ligne	42
Tableau VII: Valeurs maximales de CO par ligne	43
Tableau VIII: Valeurs maximales et minimales de CO_2 par ligne	44
Tableau IX: Valeurs maximales et minimales de PM_{10} obtenues.....	46
Tableau X: Concentrations moyennes des oxydes d’azote (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	47
Tableau XI: Valeurs maximales d’oxydes d’azote observées par ligne (en mg/m^3)	48
Tableau XII: Etat global de la pollution dans Dakar	48

LISTE DES FIGURES

Figure 1: cycle journalier des polluants en zone urbaine (d'après Masclet, 2005)	15
Figure 2: Voie pulmonaire d'infiltration des PM et mécanismes probables d'action sur le système cardiovasculaire (Nalbone, 2010)	19
Figure 3: Pyramide des effets de la pollution atmosphérique (Airparif, 2017)	21
Figure 4: schéma de l'appareil EVM	35
Figure 5: Capteurs de gaz et cheminement de l'air	36
Figure 6: Appareil de mesure AQ-PRO	37
Figure 7: Teneurs en CO retrouvés au cours des trajets	43
Figure 8: Teneurs en CO ₂ retrouvés au cours des trajets	44
Figure 9: Teneurs en PM ₁₀ retrouvés au cours des trajets	45

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PARTIE I GENERALITES SUR LA POLLUTION LIEE AU TRAFIC AUTOMOBILE	5
1. LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	6
1.1. Sources naturelles	7
1.2. Sources anthropiques	7
1.2.1 Les sources fixes	8
1.2.2 Les sources mobiles.....	8
2. LA POLLUTION D'ORIGINE AUTOMOBILE.....	9
2.1. Les principaux polluants d'origine automobile	9
2.1.1 Les polluants particuliers.....	10
2.1.2 Les polluants gazeux	11
2.2. Devenir des polluants dans l'atmosphère	12
2.2.1 Transport et dispersion des polluants	12
2.2.2 Transformations physico-chimiques des polluants atmosphériques..	14
2.3. Les personnes les plus sensibles à la pollution.....	16
2.4. Transfert des polluants et effets sur la santé humaine de quelques polluants	17
2.4.1 Le monoxyde de carbone (CO)	17
2.4.2 Le dioxyde de carbone (CO ₂).....	17
2.4.3 Le dioxyde d'azote (NO ₂)	18
2.4.4 Les particules.....	18
2.5. Impact global sur la prévalence et l'aggravation des maladies respiratoires	20
2.5.1 L'asthme et la rhinite allergique.....	21
2.5.2 Les maladies cardiovasculaires	22
2.5.3 La Bronchite Pulmonaire Chronique Obstructive.....	23

2.6. Législation sur la pollution	24
2.6.1 Normes de l'OMS	24
2.6.2 Normes Européennes.....	25
2.6.3 Normes Sénégalaises.....	28
PARTIE II METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	30
1. CADRE D'ETUDE.....	31
1.1. Conditions et période des mesures	31
1.2. Echantillonnage des lignes	32
2. MATERIELS POUR L'EVALUATION DE LA POLLUTION	33
2.1. Dosage du CO, du CO ₂ et des PM ₁₀ par l'EVM-7	34
2.2. Dosage du NO, du NO ₂ et du NO _x par l'AQ-Pro	36
PARTIE III RESULTATS ET DISCUSSION	39
1. RESULTATS	40
1.1. Conditions de voyage et états des véhicules.....	40
1.2. Les concentrations obtenues	42
1.2.1. Les oxydes de carbone.....	42
1.2.2. Les particules en suspension.....	45
1.2.3. Les oxydes d'azote	46
2. DISCUSSION	49
CONCLUSION.....	50
REFERENCES	50

INTRODUCTION

L'environnement est l'ensemble de toutes les influences directes et indirectes exercées sur l'être vivant et de ses relations avec le reste du monde (ADEME, 2014). En effet les espèces vivantes dépendent les uns des autres et de leur milieu, ce qui compose ainsi d'innombrables éléments influant les uns sur les autres, qu'on appelle les facteurs écologiques (ADEME, 2014). Cet environnement, notamment l'air, est menacé par les activités humaines qui le polluent.

La pollution atmosphérique n'a pris une place importante comme problème social qu'à partir des années 1950, marquées par une série d'épisodes majeurs de pollution tels que les épisodes dramatiques de Londres 1952 au cours duquel 4000 décès ont été enregistrés en 2 semaines (Gerin et *al*, 2005). La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996 a défini la pollution de l'air comme « l'introduction par l'homme, directement ou indirectement dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances présentant des risques pour la santé, les écosystèmes, d'influer sur le climat, de détériorer les biens matériels, de provoquer des nuisances olfactives » (Elichegaray et *al*, 2009).

La pollution due aux activités humaines est appelée pollution anthropique. Les sources de cette pollution sont nombreuses et variées et ne sont pas aisément quantifiables, qu'elles soient fixes ou mobiles (Elichegaray et *al*, 2009). Parmi les sources mobiles, l'industrie de l'automobile, qui est une grande productrice de déchets, occupe désormais une grande place. Cette pollution automobile est donc accentuée par l'augmentation considérable du parc automobile qui a été constaté au début des années 1990 (Gerin et *al*, 2005).

De nos jours, avec le phénomène d'urbanisation, la croissance de plus en plus rapide du parc automobile entraîne une augmentation constatée des effets néfastes de la pollution sur la santé humaine. En effet, plusieurs études épidémiologiques ont révélé que la pollution due aux automobiles augmente l'incidence de certaines maladies respiratoires et cardiovasculaires, tel que

l'asthme ou la rhinite allergique (Rochat et *al*, 2012, Nalbone, 2010, Allain, 2010). En plus de ces études épidémiologiques, des études toxicologiques ont aussi été menées afin de déterminer spécifiquement les polluants en cause, les mécanismes d'action de ces polluants émis par les automobiles et leurs impacts sur la population locale. Ces études ont été menées dans plusieurs grandes villes tel que Delhi en Inde (Pramila et *al*, 2013), Taiwan en Chine (Chun-Fu et *al*, 2015) et même Rouen et Ile-de-France en France (Morin et *al*, 2009). Chaque ville ayant ses spécificités en termes de population, de climat et de densité du parc automobile. Les résultats obtenus peuvent différer d'une ville à une autre.

A Dakar, le parc automobile est aussi important que dans beaucoup de ces grandes villes. Mais il est en majorité composé de véhicules de transport en commun parmi lesquels les minibus AFTU (Association de Financement du Transport Urbain) communément appelés bus TATA qui occupent une grande place. Ces véhicules sont empruntés par une grande partie de la population et desservent toute la capitale (CETUD, 2015). Le trafic routier étant aussi très dense selon le CETUD (Conseil Exécutif des Transports Urbains de Dakar) avec 1607 minibus mis en circulation en 10 ans et 1,8 millions de déplacements par an, les taux de polluants à Dakar peuvent être très élevés.

Du fait de leur travail, les chauffeurs et les receveurs de bus qui passe toute la journée dans le trafic routier sont les sujets les plus exposés à cette pollution, toutefois ces sujets ne sont pas toujours les plus sensibles à cette pollution. Certains passagers peuvent aussi être plus affectés que d'autres d'où la nécessité de déterminer exactement les concentrations de polluants dans ces minibus empruntés par un échantillon important de la population, selon le CETUD environ 644 000 voyageurs par jour.

Pour mieux estimer le niveau d'exposition de la population et plus particulièrement celle travaillant dans ces minibus, nous nous sommes fixés comme objectif dans cette présente étude de mesurer les niveaux de certains polluants dans l'habitacle des transports en commun communément appelés

minibus TATA qui circulent dans Dakar et sa banlieue. Elle vise de façon plus spécifique à :

- Mesurer les concentrations de certains polluants tels que le NO₂, le NO, le NO_x, le CO₂, le CO et les PM₁₀
- Déterminer les facteurs influençant les concentrations des différents polluants

Cette étude est scindée en trois parties.

La première partie de cette étude présente une revue bibliographique en termes de pollution atmosphérique notamment celle liée au parc automobile, mais aussi des risques sanitaires dus à cette pollution.

Dans la deuxième partie, la méthodologie d'échantillonnage et de dosage des polluants va être exposée.

Et dans la troisième partie, les résultats obtenus vous seront présentés.

Cette thèse va être achevée par une discussion suivie de recommandations.

PARTIE I
GENERALITES SUR LA
POLLUTION LIEE AU TRAFIC
AUTOMOBILE

1. LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

La pollution atmosphérique peut être définie par la présence de polluants (gazeux ou particules) dans l'atmosphère, pouvant provoquer des effets nocifs sur l'environnement et la santé (Masclet, 2005). On compte aujourd'hui des dizaines de milliers de molécules différentes, polluants avérés ou suspectés qui agissent en synergie entre eux et avec d'autres paramètres (UV solaire, ozone, hygrométrie, acides, etc.) (Boussouaka, 2010).

L'OMS définit la pollution atmosphérique comme étant

Cette pollution, qu'elle soit brève ou chronique, émise massivement ou en quantité dispersée (émise par les centaines de millions de pots d'échappement), est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'atmosphère. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions de rejets ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, la diffusion et les retombées de ces polluants.

Les phénomènes de pollution ont lieu dans la troposphère (la plus basse couche de l'atmosphère) où des quantités de plus en plus importantes de gaz et de particules potentiellement nuisibles sont émis et entraînent des dommages à la santé humaine et à l'environnement (Boussouaka, 2010).

L'atmosphère étant un système dynamique extrêmement complexe, malgré le grand nombre d'études menées sur le sujet, les estimations des émissions à l'échelle planétaire sont parfois divergentes, ce qui rend difficile l'estimation de la part naturelle et de la part anthropique de la pollution. Il est néanmoins évident que cette dernière est beaucoup plus importante à proximité des zones très peuplées.

1.1.Sources naturelles

Les polluants gazeux et particulaires d'origine naturelle peuvent être émis par les volcans, l'érosion des roches, la remise en suspension de poussières du sol, les embruns et pétilllements marins, les feux de brousse ou de forêt (aérosol de combustion de la biomasse), la respiration des plantes (aérosol biogénique)

Ainsi la nature génère entre autres composés : des composés soufrés, des composés azotés, des matières particulaires et du monoxyde de carbone. Les composés soufrés proviennent majoritairement de l'activité volcanique sous forme de dioxyde de soufre, ou alors du pétilllement marin principalement constituées de H_2S (Masclét, 2005).

Les composés azotés proviennent de la combustion de la biomasse, de l'injection d'ammoniac ou des éclairs durant les orages qui produisent de l'oxyde d'azote NO . Ainsi on peut retrouver à l'état naturel du dioxyde d'azote NO_2 , de l'oxyde d'azote NO , de l'ammoniac NH_3 et de l'oxyde de diazote N_2O (Masclét, 2005).

Les matières particulaires proviennent de toutes les sources naturelles sous forme de poussières ou aérosols.

Le monoxyde de carbone présent à l'état naturel provient non pas d'une combustion incomplète mais plutôt de l'oxydation photochimique du méthane qui est l'hydrocarbure naturel le plus abondant.

Ces composés retrouvés naturellement dans l'atmosphère sont aussi produits par l'activité humaine et émis en quantité non négligeable dans l'atmosphère.

1.2. Sources anthropiques

La pollution anthropique est celle due à l'activité humaine. Les sources de cette pollution peuvent être fixes ou mobiles, ponctuelles ou diffuses. Elles résultent de phénomènes de combustion ou sont d'origine plus spécifique (Boussouaka, 2010).

1.2.1 Les sources fixes

Les sources fixes correspondent :

- Aux installations de combustion individuelles, collectives ou industrielles (chauffage et générateur d'énergie)
- Aux installations d'incinération et de gestion des déchets (notamment ménagers)
- Aux installations industrielles et artisanales : métallurgie, sidérurgie, raffineries, pétrochimie, cimenteries, chimie, etc.

Les parts respectives de ces sources dans le phénomène de pollution global varient en fonction de la nature des agglomérations, de l'organisation urbaine et du degré d'industrialisation des villes (Gerin, 2005).

Les principaux polluants de ces sources fixes dérivent de l'oxydation du carbone organique présent dans les combustibles, d'impuretés (soufre) et de l'azote de l'air (Gerin, 2005).

1.2.2 Les sources mobiles

Les sources mobiles sont constituées des transports maritimes, aériens et surtout terrestres (Gerin, 2005). Aujourd'hui dans les villes, la pollution d'origine industrielle a cédé la place à une pollution plus diffuse et plus proche des populations, liée aux transports.

Ce phénomène est aggravé par le nombre croissant de véhicules. Ceci malgré les importantes avancées dans le secteur du transport qui visent à réduire les polluants émis par les automobiles. Le transport routier reste quand même l'une des principales sources de pollution anthropique.

Les polluants émis par ces automobiles proviennent surtout des effluents d'échappement des moteurs, mais aussi de l'évaporation des essences. Le plomb (Pb) était autrefois présent dans les moteurs à essence et constituait un danger considérable mais a été interdit dans presque tous les pays depuis des années.

Depuis l'arrivée des biocarburants, les composés organiques volatiles COV_s (aldéhydes, acides organiques) sont aussi retrouvés dans les moteurs à essence.

Pour surveiller la pollution d'origine automobile, il a donc été nécessaire de ne retenir que quelques indicateurs (ou traceurs) de pollution, sélectionnés en fonction de la facilité du mesurage, de la nocivité potentielle, et de l'évolution chimique du polluant (Gerin, 2005).

Habituellement ces indicateurs sont exprimés sous la forme d'une concentration ambiante d'un composé donné, pour une période de temps donné. Des normes sont ainsi définies pour certains polluants.

2. LA POLLUTION D'ORIGINE AUTOMOBILE

La pollution atmosphérique a de graves conséquences aussi bien pour l'environnement que pour la santé des êtres vivants. La pollution de proximité, notamment la pollution d'origine automobile, affecte principalement la santé des personnes qui sont exposées.

Le trafic routier est à l'origine de l'émission de nombreux polluants de l'air. Il constitue l'un des principaux émetteurs de particules et de NO_x, en particulier dans les zones urbaines. En octobre 2013, l'Organisation mondiale de la santé a classé la pollution de l'air extérieur comme cancérigène certain pour l'homme. Les polluants atmosphériques, et en particulier les particules, représentent un problème majeur de santé publique (ADEME, 2014).

2.1. Les principaux polluants d'origine automobile

L'aérosol atmosphérique, très complexe, est constitué de deux phases, gazeuse et particulaire (de très fines particules solides ou liquides en suspension dans l'air) qui sont interactives et évolutives. Par exemple, des composés gazeux peuvent évoluer vers l'état particulaire et des particules peuvent adsorber des gaz. L'aérosol est ainsi constitué d'une myriade de composés dont seuls quelques constituants sont connus (Gerin, 2005). Ainsi pour les automobiles, les

émissions sont surveillées par certains indicateurs tels que ceux particuliers de PM_{10} et $PM_{2,5}$ et ceux gazeux de CO, NO_x et des HAPs

2.1.1 Les polluants particuliers

Les particules fines PM_{10} et $PM_{2,5}$ sont des matières solides en suspension dont le diamètre est inférieur respectivement à 10 et 2,5 micromètres. Les particules ultrafines sont par contre des particules de taille comprise entre 0,1 et 0,5 micromètres (ADEME, 2014). Les particules issues du trafic routier sont principalement de trois types (ADEME, 2014) :

- Les particules issues de l'échappement des véhicules qui sont notamment composé de carbone suie. Ils proviennent majoritairement des véhicules Diesel et sont appelées particules primaires fines.
- Les particules qui se forment dans l'air extérieur à partir des gaz précurseurs émis à l'échappement sont des particules secondaires. Ces gaz sont principalement des oxydes d'azote qui conduisent à la formation de nitrate d'ammonium particulaire et de composés organiques volatils. Ces particules secondaires ne sont filtrables au niveau du véhicule.
- Des particules sont aussi émises par l'usure des pneus, des embrayages, des freins et par la remise en suspension des particules déposées sur la chaussée.

Les particules atteignent tous les niveaux de l'appareil respiratoire. Mais en fonction de leur taille, certains restent au niveau des voies supérieures et d'autres plus petites, inférieurs à 2,5 μm , atteignent plus facilement les alvéoles.

2.1.2 Les polluants gazeux

2.1.2.1 Les oxydes d'azotes

Le dioxyde d'azote (NO_2), lié à la combustion du carburant, est pour partie émis directement en sortie du pot d'échappement et pour partie formé indirectement dans l'atmosphère à partir de l'oxyde d'azote (NO) (ADEME, 2014).

Les NO_x constituent la somme des NO et des NO_2 . Le transport routier est le premier secteur émetteur de NO_x en France, avec 56 % des émissions nationales en 2011. Les émissions des transports routiers proviennent à 89% des véhicules Diesel (poids lourds Diesel : 41%, véhicules particuliers Diesel catalysés 33%, véhicules utilitaires légers Diesel catalysés 15%) (ADEME, 2014). L'émission des oxydes d'azote conduit secondairement à la formation d'ozone.

2.1.2.2 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs)

Ce sont des composés organiques dont la molécule comporte au moins deux noyaux benzéniques. On y trouve des composés tels que le benzo(a)pyrène qui est cancérogène. Certains HAP peuvent aussi affecter le système immunitaire. Dans l'air ils proviennent notamment des combustions du secteur domestique dans des conditions mal maîtrisées (mauvaises combustions du bois dans des cheminées et foyers ouverts) et pour une plus faible part de la circulation automobile (Elichegaray et *al*, 2009).

2.1.2.3 Le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone

Le CO est un gaz inodore, incolore, insipide, non irritant, non suffocant, inflammable et potentiellement détonant. C'est le produit de la combustion incomplète de combustibles organiques (hydrocarbures). Et dans le cas des véhicules, de la combustion incomplète de l'essence ou du gasoil. Sa densité, très proche de celle de l'air, est de 0,967 et est un constituant naturel de l'atmosphère (Donati et *al*, 2005). La concentration de CO dans l'atmosphère est

en moyenne inférieure à 10 parties par million (ppm), ce taux étant plus élevé en zone urbaine qu'en zone rurale.

On retrouve souvent une accumulation de CO ambiant dans les égouts, les parcs de stationnement (aux alentours de 100 ppm), et les garages automobiles. L'intoxication professionnelle chronique dans ces lieux est reconnue comme maladie professionnelle, les concentrations de CO égales ou supérieures à 50 ppm (1,5 ml/100 ml de sang) étant considérées comme susceptibles de déclencher des intoxications professionnelles pour une exposition de 7 à 8 h/j (Donati et al, 2005).

Le CO₂ est aussi un gaz incolore et inodore. Il est présent naturellement dans l'air et est respiré en même temps que l'oxygène. Le CO₂ est non réactif et s'accumule dans l'atmosphère (Masclet, 2005).

Ces polluants ne sont pas tous stables dans l'atmosphère et sont dispersés ou déposés, tout en subissant pour certains des modifications physico-chimiques.

2.2. Devenir des polluants dans l'atmosphère

L'importance d'un composé pour l'environnement dépend de sa quantité et de la voie par laquelle elle parvient dans les différents compartiments ainsi que des interactions qui ont lieu entre lui et les êtres vivants (Bliefert et Perraud, 2011). Les polluants sont transportés entre les différents compartiments de l'environnement. Ils affectent les êtres vivants et l'environnement soit directement (polluants primaires) ou après avoir subi des réactions de transformation dans l'atmosphère (polluants secondaires).

2.2.1 Transport et dispersion des polluants

Le transport des substances définit leur changement de lieu dans l'environnement. Il s'agit donc de la capacité d'une substance de parvenir à d'autres endroits, où elle déploiera éventuellement ses effets ou sera transformée (Bliefert et Perraud, 2011).

Ainsi les concentrations et la distribution spatiotemporelle des polluants peuvent être déterminées par des paramètres physiques qui relèvent de la dynamique atmosphérique (Masclet, 2005). Un épisode de pollution est donc observé lorsque les émissions de polluants sont importantes et que la météo est défavorable.

Quatre situations météorologiques peuvent favoriser les phénomènes de pollution (Masclet, 2005) :

- Absence de vent ou vent faible : le vent tend à disperser la pollution surtout en l'absence de relief. Plus le vent est fort plus la pollution se disperse rapidement. Cependant, le vent peut aussi entraîner des phénomènes d'accumulation (en cas de barrière).
- La chaleur et la lumière : elles augmentent la probabilité et la vitesse des réactions photochimiques ainsi que les concentrations de radicaux oxydants. Dans les deux cas, certaines espèces tels que les espèces primaires disparaissent plus vite mais les espèces secondaires, comme l'ozone, apparaissent plus rapidement.
- Absence de pluies : en effet, la présence de pluies (ou de neiges) conduit à une diminution de la pollution. Les gouttes d'eau dissolvent les gaz dans les nuages, c'est le phénomène d'incorporation. En tombant les particules et certains gaz sont aussi lessivés par la pluie, c'est le phénomène d'abattement. Toutefois il peut y avoir transfert de pollution de l'air vers les sols et les eaux de surface.

Les composés subissent donc l'influence des phénomènes météorologiques qui les dispersent mais aussi favorisent dans certains cas leur persistance. La persistance des composés correspond à leur stabilité dans l'environnement, à leur résistance à une décomposition ou une transformation dans la nature.

2.2.2 Transformations physico-chimiques des polluants atmosphériques

L'atmosphère peut être considérée comme un immense compartiment dans lequel ont lieu de nombreuses réactions chimiques. Ces transformations contribuent à son autoépuration, mais sont également à l'origine d'espèces chimiques plus ou moins réactives aux plans physico-chimique et biologique.

Les réactions de base de l'atmosphère sont :

- L'oxydation du monoxyde d'azote NO en dioxyde d'azote NO₂
- L'oxydation du méthane en monoxyde de carbone CO, puis du CO en dioxyde de carbone CO₂. (Masclet, 2005)

Le principal cycle troposphérique est celui liant les réactions photochimiques entre les oxydes d'azote, COV et radicaux et la formation de l'ozone suite à la photolyse du NO₂. Il a d'abord été soupçonné une réaction thermique directe d'oxydation de NO par l'oxygène :



En fait cette réaction n'est pas possible car elle est trop lente. Pour une concentration de 100ppb de NO à température ambiante, il faut 230 jours pour oxyder complètement NO en NO₂. La réaction d'oxydation du dioxyde d'azote est donc couplée à la réaction d'oxydation des hydrocarbures. Les agents de réaction sont des radicaux oxydants présents dans l'atmosphère en faibles quantités. Ces radicaux initialisent les réactions et sont régénérés en fin de chaîne, de telle sorte que leur concentration reste plus ou moins constante (état quasi stationnaire des radicaux). (Masclet, 2005)

On a: **Etape 1** $\text{NO} + \text{COV} + \text{O}_2 + (\text{OH}^\circ) \longrightarrow \text{aldehydes} + \text{NO}_2 + (\text{OH}^\circ)$

Etape 2 $\text{NO} + h\nu + \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO} + \text{O}_3$

Lorsque la concentration de NO est forte (le matin ou en centre-ville) on observe la réaction inverse de destruction de l'ozone dite titration de l'ozone :



Cette chimie détermine le cycle diurne des polluants. Ainsi le maximum d’ozone est observé en milieu d’après-midi, quand il n’y a presque plus de NO (voir figure 1) :

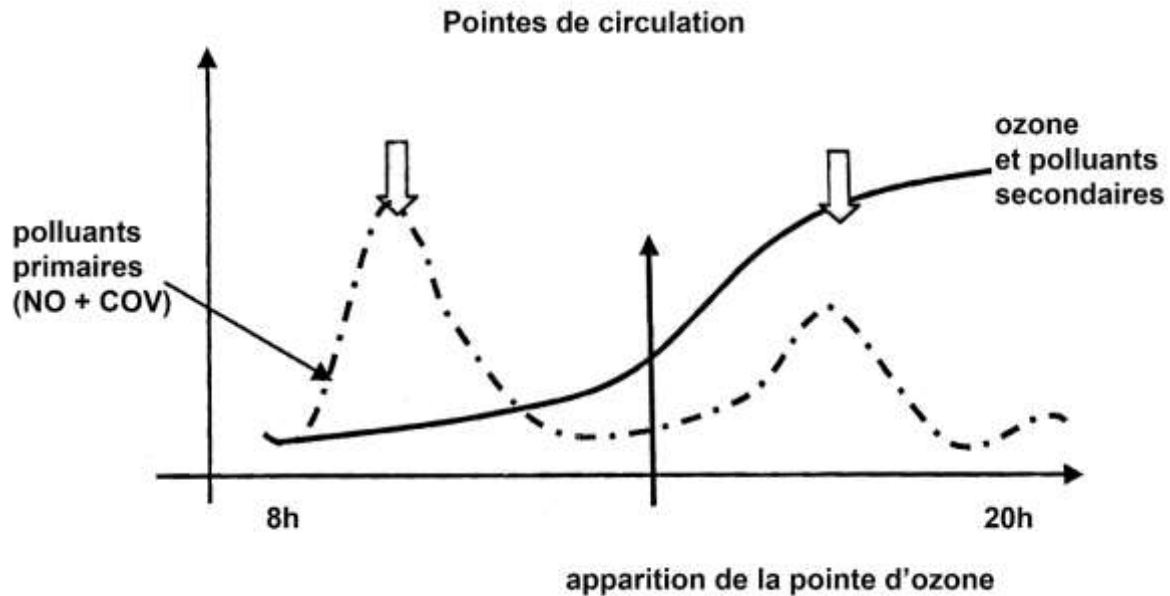
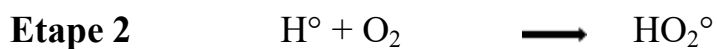
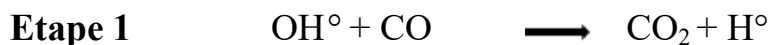


Figure 1: cycle journalier des polluants en zone urbaine (d’après Masclet, 2005)

La réaction d’oxydation (ou combustion photochimique) la plus simple, met en jeu l’oxyde de carbone CO :



puis NO_2 se photolyse en ozone :



L’ozone est peu réactif et perdure quelques semaines dans l’atmosphère. Dans la troposphère, son impact reste localisé près des zones urbaines ou peuplées du fait de la pollution automobile.

2.3. Les personnes les plus sensibles à la pollution

Les chauffeurs, les apprentis chauffeurs et les receveurs de billet sont exposés professionnellement et sont donc les plus exposés à la pollution d'origine automobile du fait des heures importantes passées dans le trafic. Toutefois, ils ne sont pas dans tous les cas les personnes les plus sensibles à cette pollution. Les populations plus sensibles ou vulnérables aux polluants d'origine automobiles sont principalement (Rochat et *al*, 2012) :

- Les femmes enceintes
- Les nourrissons et enfants de moins de 5 ans dont les poumons ne sont pas complètement formés
- Les personnes âgées, plus sensibles en raison du vieillissement et de la présence de pathologies chroniques
- Les personnes souffrant de pathologies chroniques (maladies respiratoires chroniques, allergies, asthme, maladies cardiovasculaires, diabète)
- Les fumeurs, dont l'appareil respiratoire est déjà irrité par le tabac
- Les personnes pratiquant une activité sportive en extérieur soumises à une exposition plus importante (augmentation de la ventilation)

Chez ces personnes les effets néfastes de la pollution sont plus marqués du fait de leur déficience respiratoire ou immunitaire ou plutôt de leur exposition supérieure à la moyenne.

L'exposition à long terme aux polluants atmosphériques, tels que les particules fines, les oxydes de carbone et les oxydes d'azote, est clairement associée à des effets importants et néfastes sur la santé (Zuber, 2006)

2.4. Transfert des polluants et effets sur la santé humaine de quelques polluants

Les voies respiratoires supérieures et inférieures sont largement ouvertes sur l'extérieur. Environ 100 m² de bronches et d'alvéoles se retrouvent ainsi en contact avec l'air inhalé. Certains polluants entraînent ainsi des effets locaux et systémiques.

2.4.1 Le monoxyde de carbone (CO)

Le CO réagit avec plusieurs hémoprotéines (ou composés héminiques) représentées en premier lieu par l'hémoglobine mais aussi par la myoglobine, le cytochrome c-oxydase. Le CO a une affinité 240 à 250 fois plus grande pour l'hème que l'oxygène et forme l'HbCO. Ceci entraîne une diminution du taux d'oxygène dans le sang et une hypoxie tissulaire particulièrement ressentie au niveau du système nerveux central. La fixation du CO sur l'hémoglobine est réversible en présence d'oxygène (Donati et *al*, 2005).

Une intoxication aigüe au CO peut entraîner un stress oxydatif au niveau cellulaire, une ischémie myocardique et des lésions nécrotiques aux niveaux cérébrales pouvant entraîner la mort (Donati et *al*, 2005). Toutefois le CO ne s'accumulant pas dans l'organisme, une intoxication chronique est peu probable. Le retrait du sujet exposé de la source de CO aboutit à l'élimination progressive du CO de l'organisme.

2.4.2 Le dioxyde de carbone (CO₂)

Le CO₂ est naturellement présent dans l'air et est respiré puis rejeté par l'organisme. Il n'est donc pas toxique (Masclet, 2005). Néanmoins, à partir de certaines concentrations importantes, la proportion d'oxygène dans l'air devient insuffisante et cela peut provoquer des suffocations et des évanouissements.

2.4.3 Le dioxyde d'azote (NO₂)

Le NO₂ accentue l'hyperréactivité bronchique. Le NO₂ est un composé irritant cellulaire. Après inhalation, il se fixe au niveau de la lumière bronchique ce qui facilite la desquamation des cellules épithéliales. De par ce fait, le polluant atteint plus facilement les terminaisons nerveuses et sensibles de la paroi bronchique. Il en découle une contractilité exagérée du muscle lisse bronchique entretenant l'hyperréactivité (Fintz, 2014).

2.4.4 Les particules

Déposées dans les alvéoles, les PM_{2.5}/PM₁₀ y séjournent et créent une inflammation locale consécutive à la présence en surface d'une part de polluants organiques et d'agents pathogènes étrangers à l'organisme et d'autre part de métaux lourds pro-oxydants (Fe, Cu, Ni, Pb...). Une partie de ces PM sera phagocytée par les macrophages alvéolaires, d'autres resteront à l'état libre, l'ensemble entretenant une inflammation locale et un stress oxydatif persistants (Dominici et *al*, 2005).

De nombreux mécanismes agissent de manière synergique au niveau de l'appareil respiratoire (Nalbone, 2010) :

- Des réactions inflammatoires entraînant une hyperréactivité bronchique
- Des modifications du système immunitaire avec un effet affaiblit envers les agents infectieux et une diminution de la tolérance au Soi
- Une activité bronchospastique accrue
- Une cytotoxicité entraînant une modification des cellules épithéliales par oxydation et un relargage de médiateurs de l'inflammation

Les particules (PM) sont aussi les principaux polluants automobiles causant des maladies cardiovasculaires. Deux voies physiopathologiques majeures rendraient compte de la toxicité cardio-vasculaire des PM. La première qui semble bien admise est que la réponse inflammatoire aux PM dans les alvéoles conduirait à la libération de médiateurs inflammatoires qui passeraient dans la

circulation sanguine et entretiendraient, voire aggraveraient des pathologies sous-jacentes (athérosclérose, diabète, obésité, infection. . .). De plus, des modifications de l'hémostase induites par l'inflammation systémique conduiraient à un état hyper-coagulable et prothrombotique. La deuxième voie, encore soumise à controverse mais néanmoins pas exclusive de la première, serait que la réponse inflammatoire locale alvéolaire altérerait l'intégrité de la barrière épithéliale favorisant la perméabilité aux PM les plus fines, qui passeraient ainsi dans la circulation sanguine, atteindraient différents organes, en particulier le muscle cardiaque et le système vasculaire, pour y distribuer les polluants et y induire ou amplifier le stress oxydatif et inflammatoire (voir figure 2) (Nalbone 2010).

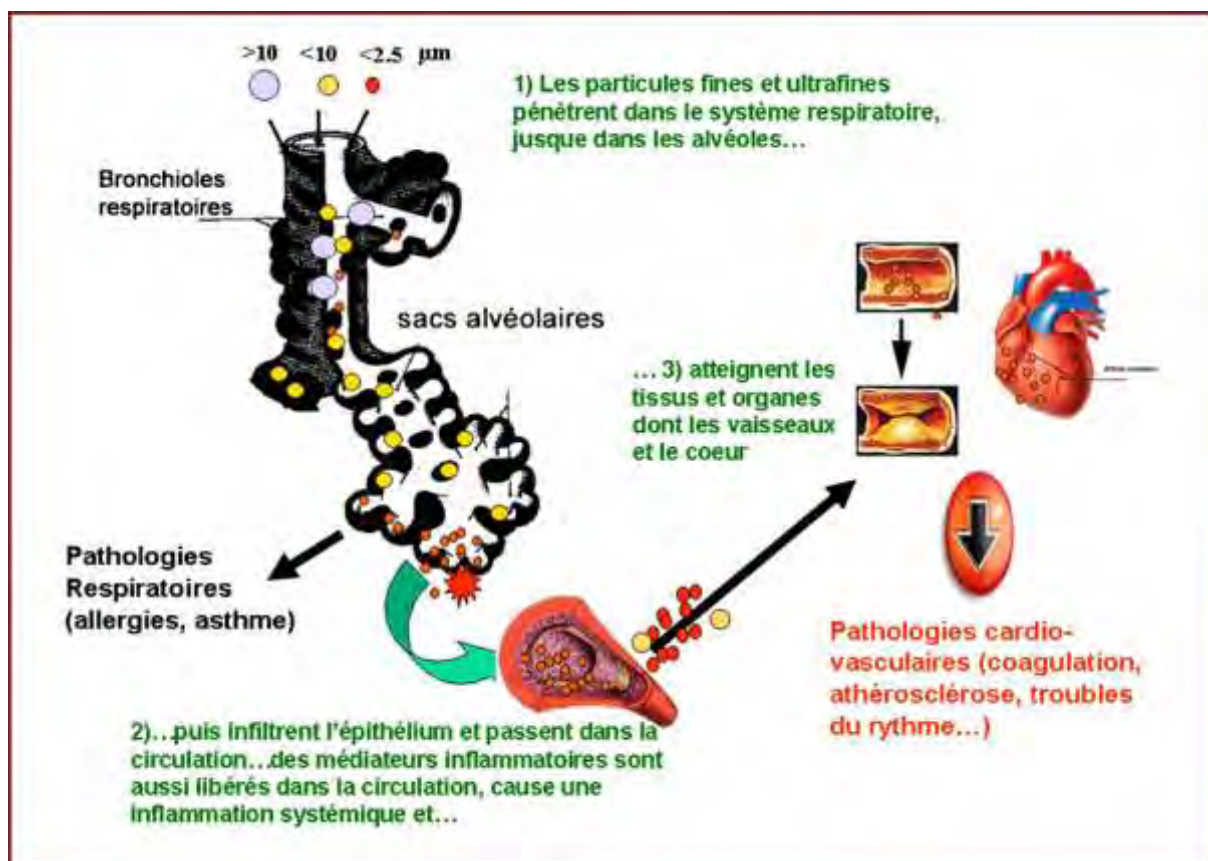


Figure 2: Voie pulmonaire d'infiltration des PM et mécanismes probables d'action sur le système cardiovasculaire (Nalbone, 2010)

Les effets délétères de la pollution particulaire résultent de l'aggravation d'une pathologie déjà installée, comme l'insuffisance respiratoire, l'infection virale, l'asthme et la bronchite pulmonaire chronique obstructive en particulier.

2.5. Impact global sur la prévalence et l'aggravation des maladies respiratoires

Les évidences de la nocivité de la pollution atmosphérique sur l'état sanitaire de la population ont été rapportées dès le début du XXe siècle. En décembre 1930, un brouillard pollué à Engis dans la vallée de la Meuse a causé le décès de plus d'une cinquantaine de personnes dans les jours qui ont suivi l'épisode de pollution. L'exemple le plus célèbre est celui de Londres où, du 5 au 9 décembre 1952, la combinaison du brouillard et des fumées (smog) a été responsable de la mort de plus de 12 000 personnes dans les huit mois qui ont suivi. Plusieurs études se sont succédées établissant un lien entre la pollution d'origine automobile et l'augmentation des hospitalisations et de la mortalité (Nalbone, 2010).

Selon les dernières études sur la charge mondiale de morbidité (CMM), la pollution de l'air aurait été à l'origine de 5.5 millions de décès prématurés à l'échelle mondiale en 2013. La pollution de l'air a aussi d'autres conséquences sur la santé, entraînant un nombre croissant de cas de maladies cardiovasculaires et d'affections respiratoires (OCDE, 2016). En effet l'appareil respiratoire constitue une voie d'exposition privilégiée pour les aéro-contaminants biologiques et chimiques, qu'ils s'agissent de gaz ou de particules inertes ou biologiques qui peuvent avoir des effets nocifs se manifestant à court et à long terme (Gerin, 2005). La figure suivante montre que la gravité des effets de la pollution diminue quand le nombre de personnes touchés augmente. Cette pyramide résume donc les types d'effets globaux de la pollution de l'air et les classe selon leur gravité (voir figure 3).



Figure 3: Pyramide des effets de la pollution atmosphérique (Airparif, 2017)

Il est difficile d'établir la nocivité respective des divers polluants, car on les respire tous en même temps. Néanmoins, grâce aux études réalisées au laboratoire chez l'homme ou sur les animaux, certains effets ont pu être démontrés par rapport à des affections broncho-pulmonaires tel que l'asthme, la rhinite allergique, la BPCO (Bronchite Pulmonaire Chronique Obstructive)

2.5.1 L'asthme et la rhinite allergique

L'asthme est une maladie inflammatoire chronique des voies aériennes. De nombreuses cellules prennent part au processus inflammatoire, c'est notamment le cas des mastocytes, des éosinophiles et des lymphocytes T (LT).

Chez les individus prédisposés, l'inflammation provoque des épisodes récidivant d'essoufflement, d'oppression thoracique et de toux, accompagnés le plus souvent de sifflements lors de l'effort. Ces épisodes sont plus fréquents et majorés la nuit et au petit matin. Certains auteurs soulignent que les toutes premières années de vie pourraient constituer une fenêtre critique d'exposition aux polluants atmosphériques, avec une implication dans la genèse de l'asthme (Rochat et *al*, 2012).

En 2001, une étude conduite dans huit grandes villes européennes a montré qu'à chaque augmentation de 10 mg/m^3 de particules fines dans l'air ambiant, on observe 1% de plus d'admissions pour asthme dans les centres d'urgences, aussi bien chez les enfants (1-14 ans) que chez les adultes (15-64 ans) (Rochat et *al*, 2012). Très récemment, dans une expérimentation clinique américaine à double insu, des volontaires avec ou sans rhinite allergique ont été exposés à des particules d'échappement de moteur diesel pendant deux heures, suivies d'une inoculation par un virus *influenza* atténué. L'exposition au diesel a entraîné une augmentation de l'activation des éosinophiles et de la réplication du virus dans la muqueuse nasale des patients allergiques. Cet effet adjuvant des particules diesel sur l'inflammation allergique et la diminution de la clairance virale prend toute sa signification clinique quand on se souvient que les infections virales représentent un des facteurs les plus communs du déclenchement des crises d'asthme (Rochat et *al*, 2012).

La pollution atmosphérique aggrave donc l'asthme, augmente le nombre de crises et diminue le degré de contrôle des asthmes sous traitement. Elle exerce un effet adjuvant sur les différents facteurs qui conditionnent la gravité de la maladie. Elle augmente aussi l'incidence de l'asthme (Rochat et *al*, 2012).

2.5.2 Les maladies cardiovasculaires

La littérature documente de plus en plus de données indiquant que les PM agissent directement et indirectement sur certains mécanismes physiopathologiques telles que des modifications de l'activité électrique et autonome du cœur, de la variabilité de la fréquence cardiaque, de la pression sanguine, la thrombose et la coagulabilité sanguine et la dysfonction vasculaire (Nalbone, 2010).

Les PM fines et ultrafines inhalées sont, à l'inverse des plus grosses particules, peu retenues par le système de filtration mucociliaire respiratoire et, atteignent de ce fait plus facilement l'intérieur des poumons et, en particulier, les bronchioles, puis les alvéoles pulmonaires. Les conséquences en seront l'aggravation d'une pathologie pulmonaire chronique existante (bronchite chronique, asthme) et l'altération des fonctions des cellules épithéliales alvéolaires (Nalbone, 2010).

Une étude de la National Morbidity Mortality and Air Pollution Study (NMMAPS) réalisée dans le début des années 2000 sur plus de 50 millions d'adultes répartis dans 90 villes américaines a montré que la mortalité journalière à court terme augmente de 0,41 % pour une augmentation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} (Dominici, 2005).

L'hospitalisation des enfants et des personnes âgées est en général plus fréquente chez ceux exposés à des concentrations de PM_{10} supérieures aux doses journalières admissibles (Nalbone, 2010).

2.5.3 La Bronchite Pulmonaire Chronique Obstructive

La BPCO est définie par la présence d'une obstruction progressive partiellement réversible des voies aériennes, associée à une réponse inflammatoire inappropriée à l'inhalation de particules ou de gaz. La prévalence des BPCO dans la population adulte des pays industrialisés est évaluée à 5–10 %. Cette prévalence augmente avec l'âge puisqu'elle atteint 15–20 % chez les patients de plus de 75 ans et même 50 % des fumeurs non sevrés de plus de 65 ans. De plus, un grand nombre de malades (environ 60 %) n'a pas connaissance de sa pathologie (Allain et *al*, 2010). L'implication de la pollution extérieure dans la constitution de cette maladie est très difficile à démontrer.

Un modèle de projection statistique comparant deux populations (population A exposée à un taux moyen de PM₁₀ de 20 mg/m³ et population B exposée à un taux moyen de PM₁₀ de 30 mg/m³) a été proposé par Künzli. Il a été calculé que cette faible variation d'exposition annuelle aux PM₁₀ dans ces deux populations conduisait à une augmentation relative de 47 % de la prévalence de sujets ayant une capacité vitale forcée inférieure à 70 % (Künzli et *al*, 2000).

Les conséquences les plus néfastes de la pollution de l'air extérieur sont liées au nombre de décès prématurés. Le rapport de l'OCDE prévoit une augmentation du nombre de décès prématurés imputables à la pollution de l'air extérieur d'environ 3 millions de personnes en 2010, selon les dernières estimations de la charge mondiale morbidité (CMM), à un intervalle de 6 à 9 millions par an en 2060 (OCDE, 2016).

Afin de limiter les conséquences de la pollution atmosphérique des normes sont étiquetées par les pays ou par l'OMS.

2.6. Législation sur la pollution

En matière de qualité de l'air, trois niveaux de réglementations imbriqués peuvent être distingués (européen, national et international). L'ensemble de ces réglementations a pour principales finalités (Airparif, 2017) :

- L'évaluation de l'exposition de la population et de la végétation à la pollution atmosphérique.
- L'évaluation des actions entreprises par les différentes autorités dans le but de limiter cette pollution.
- L'information sur la qualité de l'air.

2.6.1 Normes de l'OMS

L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) recommande des niveaux d'exposition (concentrations et durées) au-dessous desquels il n'a pas été observé d'effets nuisibles sur la santé humaine ou sur la végétation (Airparif, 2017).

Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air sont basées sur les données scientifiques disponibles concernant la pollution de l'air et ses conséquences sur la santé (OMS, 2005). L'objectif final de la gestion de la qualité de l'air et de la réduction des risques sanitaires devrait cependant être, dans toutes les régions, de progresser vers les valeurs indicatives de l'OMS ainsi résumée en tableau à partir des valeurs guides de 2000 (OMS, 2000) et de celles de la révision de 2005 (OMS, 2005)

Tableau I: Lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air.

Polluants		Moyenne annuelle	Moyenne sur 24h	Moyenne sur 8h	Moyenne par heure	Moyenne 10-15min
Particules (PM)	PM _{2,5}	10 µg/m ³	25 µg/m ³	-	-	-
	PM ₁₀	20 µg/m ³	50 µg/m ³	-	-	-
Dioxyde d'azote NO ₂		40 µg/m ³	-	-	200µg/m ³	-
Ozone O ₃		-	-	100µg/m ³	-	-
Plomb Pb		0,5µg/m ³	-	-	-	-
Monoxyde de carbone CO		-	-	10 000 µg/m ³	30 000 µg/m ³	100 000 µg/m ³

Source : tableau modifié (OMS, 2000 et 2005)

2.6.2 Normes Européennes

Les directives européennes établissent des mesures visant à (Airparif, 2017) :

- Définir et fixer des objectifs concernant la qualité de l'air ambiant, afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs pour la santé humaine et pour l'environnement dans son ensemble.
- Évaluer la qualité de l'air ambiant dans les États membres sur la base de méthodes et critères communs.

- Obtenir des informations sur la qualité de l'air ambiant afin de contribuer à lutter contre la pollution de l'air et les nuisances et de surveiller les tendances à long terme et les améliorations obtenues grâce aux mesures nationales et communautaires.
- Faire en sorte que ces informations sur la qualité de l'air ambiant soient mises à la disposition du public.
- Préserver la qualité de l'air ambiant, lorsqu'elle est bonne, et l'améliorer dans les autres cas.

La stratégie communautaire de surveillance de la qualité de l'air se base sur la directive européenne (2008/50/CE) du 21 mai 2008 et sur la directive n°2004/107/CE du 15 décembre 2004 (Airparif, 2017). Les valeurs directives sont résumées dans le tableau suivant (voir tableau II).

**Tableau II: Directives européennes des valeurs limites et des seuils d'alertes
(en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)**

Polluants	Valeurs limites	Seuils d'alerte	Niveaux critiques
Dioxyde d'azote (NO_2)	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par an Ou 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par heure (moins de 18 heures par an)	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire sur 3 heures consécutives	
Oxydes d'azote (NO_x)			En moyenne annuelle (équivalent NO_2)
Particules fines : (PM_{10} et moins)	En moyenne annuelle : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En moyenne journalière : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.		
Particules ultrafines : ($\text{PM}_{2,5}$ et moins)	En moyenne annuelle : <u>Phase 1</u> : 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 01/01/15. <u>Phase 2</u> : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2020.		
Monoxyde de carbone (CO)	En moyenne sur 8 heures : 10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.		

Source : tableau modifié (Airparif, 2017)

Les normes européennes sont des normes communes à plusieurs pays membres de l'Union Européenne, mais un pays peut avoir un code environnemental qui lui est propre.

2.6.3 Normes Sénégalaises

Les normes nationales sont instaurées en fonction de l'économie, de la faisabilité technologique, de l'équilibre entre les risques sanitaires et de divers autres facteurs politiques et sociaux (OMS, 2005).

La norme sénégalaise NS 05-062 relative à la pollution atmosphérique est étiquetée dans le code de l'environnement. Cette norme a été adoptée par le Comité technique de normalisation dans le domaine de l'Environnement et des Ressources naturelles (ASN/CT5). L'avant-projet qui a abouti à la norme a été préparé et rédigé par la Direction de l'Environnement et des Etablissements classés, par ailleurs structure assurant la Présidence du Comité Technique.

La présente norme vient compléter le décret n°2001-282 du 12 avril 2001 portant application de la loi n°2001-01 du 15 janvier 2001 portant Code de l'Environnement (Code de l'environnement, 2003).

Cette norme fixe les exigences auxquelles doivent satisfaire les gaz et les fumées des véhicules terrestres à moteur, les procédures de contrôle et de mesure et l'appareillage y afférents.

Tableau III: Les valeurs limites d'Immissions (tableau modifié du code de l'environnement du Sénégal)

Substance	Valeur limite d'immission	Définition statistique
Dioxyde d'azote (NO ₂)	200 µg/m ³ 40 µg/m ³	Moyenne horaire Moyenne annuelle
Monoxyde de carbone (CO)	30 mg/m ³	Moyenne par 24 h ; ne doit en aucun cas être dépassé plus d'une fois par année
Ozone (O ₃)	120 µg/m ³	Moyenne sur 8 heures
Poussières en suspension (PM ₁₀)	80 µg/m ³ 260 µg/m ³	Moyenne annuelle Moyenne sur 24 h ; ne doit en aucun cas être dépassée plus d'une fois par année

Pour les véhicules, les dispositions relatives aux méthodes de mesure contenues dans la norme sénégalaise NS 05-060 sont applicables. En comparaison des normes internationales, les normes sénégalaises sont beaucoup moins strictes. Néanmoins les véhicules entrants au Sénégal suivent déjà les normes des constructeurs qui sont, pour la plupart, européennes.

En raison des dangers que constituent la pollution automobile, il est important d'en mesurer le niveau à Dakar qui est la région la plus peuplée et ayant le plus grand parc automobile au Sénégal.

PARTIE II

METHODOLOGIE DE

L'ETUDE

Dans cette partie, nous exposerons le cadre de l'étude notamment les conditions climatiques des voyages et le système d'échantillonnage des lignes, mais aussi le matériel utilisé pour mesurer les polluants à bord des minibus TATA.

1. CADRE D'ETUDE

1.1. Conditions et période des mesures

Cette étude a été menée dans la région de Dakar qui abrite les effectifs les plus élevés de populations du Sénégal. En effet, selon le rapport de l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), le dernier recensement de la population effectué en 2013 montre que sur les 13 508 715 habitants du Sénégal 23,2% résident à Dakar soit 3 139 325 habitants pour environ 550 km² (ANSD, 2015). Cette forte densité de population couplée à la concentration des infrastructures dans Dakar favorise des déplacements de plus en plus importants des personnes et un nombre croissant de véhicules dans la région.

Selon une enquête sur les déplacements des dakarois réalisée par la CETUD en 2015, près de 1,8 million de déplacements sont effectués par jour dans les transports publics dont 700 000 (40%) dans le seul département de Dakar. De manière plus détaillée, 35% des déplacements sont réalisés par les minibus de l'AFTU, 20% par les cars rapides, 12% par les « clandos », 10,5% par les taxis, 6% par les bus DDD et 4% par les cars « Ndiaga Ndiaye » (CETUD, 2015).

La majorité des déplacements interurbains ont lieu en semaine durant les jours ouvrables et dans les minibus AFTU.

Les mesures de la pollution dans ces minibus ont donc été réalisées du lundi au vendredi pendant à peu près un mois et demi, du 11 novembre au 31 décembre 2016. Cette période coïncide avec l'Harmattan de novembre venant du désert et le début des vents frais de décembre. C'est donc une période marquée par des vents de poussières.

1.2. Echantillonnage des lignes

Pour chaque mesure, nous avons voyagé dans le bus à partir du garage jusqu'au terminus final en aller et retour. Afin d'avoir une bonne représentativité de notre échantillon, nous avons choisi un échantillonnage en grappe et à deux degrés.

Ainsi trois principaux garages, se situant en centre-ville, ont été retenus de façon aléatoire :

- Le garage de Sahm : C'est le terminus de 4 lignes de minibus assurant la liaison entre Dakar et sa banlieue dont une vingtaine de bus. Ce garage situé au carrefour des axes de Gueule Tapée, Médina et Fass, est traversé par plusieurs autres lignes secondaires mais aussi par des Cars Rapides, des « Ndiaga Ndiaye », et d'autres bus comme les Dakar Dem Dikk.
- Le garage de Petersen : situé en plein centre-ville non loin de l'avenue Blaise Diagne. Ce terminus accueille une vingtaine de ligne de bus et plus d'une centaine de minibus. C'est l'une des gares routières les plus fréquentées et en plus d'accueillir des minibus, elle accueille aussi des « Ndiaga Ndiaye » et des cars et une énorme quantité de personnes.
- Le garage de Lat Dior : qui est aussi situé au cœur du marché Sandaga. Il est constitué d'une quinzaine de ligne de bus dont une cinquantaine de minibus qui assurent les différentes liaisons. Notons qu'à ce niveau aussi plusieurs autres lignes subsidiaires de minibus « Ndiaga Ndiaye » desservent quelques trajets menant vers les quartiers périphériques du centre-ville.

Ensuite dans chaque garage trois (03) lignes de minibus ont été choisies. Le tableau IV présente les lignes choisies dans chaque garage et leur destination.

Tableau IV: Lignes sélectionnées en fonction du garage et de la destination

	Lignes	Destinations
Première session :	Ligne 31	Pikine-Texaco
Garage de Sahm	Ligne 38	Guédiawaye
	Ligne 58	Fass Mbao
Deuxième session :	Ligne 5	Parcelles assainies
Garage de Petersen	Ligne 25	Cambérène 2
	Ligne 29	Parcelles assainies (par marché HLM)
Troisième session :	Ligne 1	Nord Foire
Garage de Lat Dior	Ligne 34	HLM Grand Yoff
	Ligne 47	Almadies

Et pour chaque ligne trois (03) trajets aller et retour sont effectués. Soit un total de 81 trajets aller-retour.

2. MATERIELS POUR L'EVALUATION DE LA POLLUTION

Afin de mener à bien cette campagne de mesure nous disposons d'un tableau de bord permettant de recenser tout évènement marquant sur le trajet tels que les embouteillages, la présence de fumée noire, les excès de passager etc. (voir annexe 1) d'un questionnaire adressé au chauffeur pour évaluer l'état de sa santé, ses antécédents (fumeurs, etc.) et l'état du véhicule (voir annexe 2) et de deux appareils portatifs de mesures des polluants : le modèle EVM-7 Environmental Monitor de 3MTM Détection Management Software DMS et le modèle AQ Pro indoor air quality monitors de E Instruments IAQ Monitors[®]. L'EVM-7 permet de quantifier les oxydes de carbone (CO et CO₂) et les particules. L'AQ-PRO permet de quantifier les oxydes d'azote (NO, NO₂ et NO_x).

2.1. Dosage du CO, du CO₂ et des PM₁₀ par l'EVM-7

Le 3MTM EVM mesure les particules et la qualité de l'air dans un instrument compact. Il permet le contrôle simultané :

- Des concentrations de masse de Particule (PM_{0.1} - PM₁₀)
- Des composés organiques volatiles
- De l'humidité Relative
- De la Température
- De dioxyde de carbone
- De certains gaz toxiques choisis

L'EVM est équipé pour mesurer plusieurs polluants à partir de divers systèmes d'échantillonnage parmi lesquels l'échantillonnage de particules (échantillonnage gravimétrique) et l'échantillonnage de capteurs de gaz.

L'échantillonnage de particules implique un photomètre laser de 90° qui mesure et stocke les niveaux de concentration de poussière aéroportée au fil du temps. La méthodologie utilisée entraîne une poignée de composants incluant une arrivée d'air, l'impacteur (qui est le sélecteur de taille de particule), la collection (le ramassage) de particules, l'échantillonnage gravimétrique (filtrage dans la cassette gravimétrique) et la pompe avec un débit égal à 1.67 litres par minute (voir figure 4).

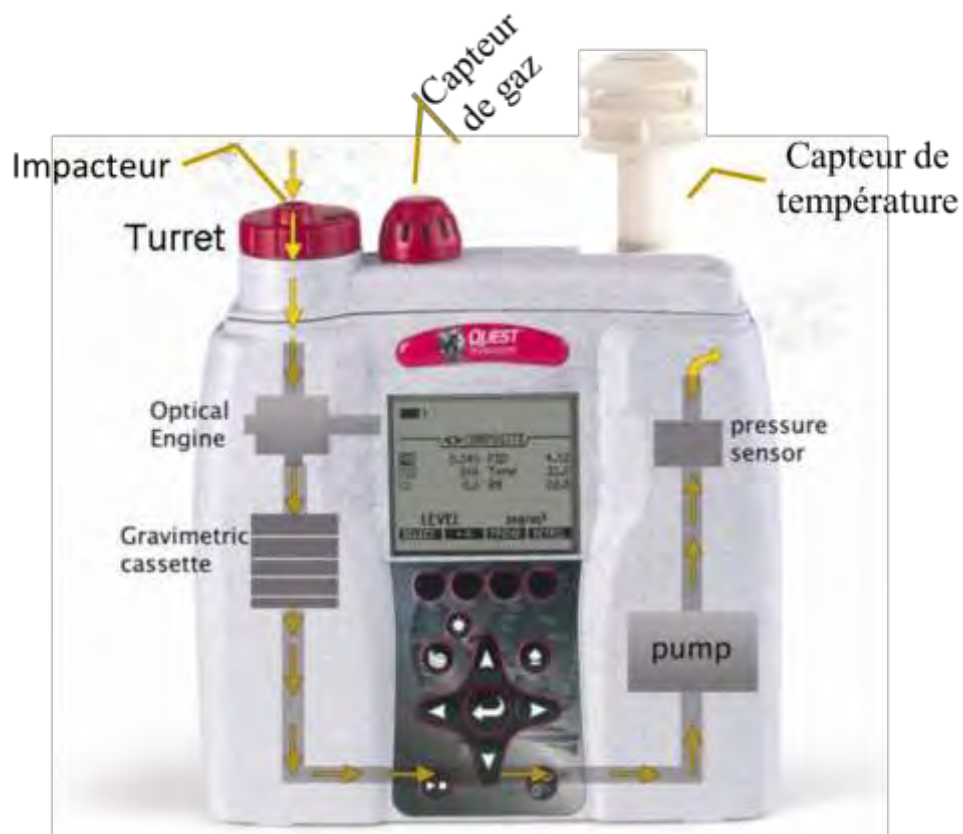


Figure 4: schéma de l'appareil EVM

Enfin de mesure, la cassette gravimétrique peut être récupérée et analysée au laboratoire.

Pour l'échantillonnage de capteurs de gaz, l'EVM utilise une technologie de capteur intelligent incluant la reconnaissance de capteur automatique et la mesure de gaz simultanément (une sélection de neuf gaz toxiques facultatifs, Dioxyde de carbone, gaz combustibles et COVs), des niveaux de calibrage, des informations de compensation de température et d'autres données de valeur qui voyagent avec le capteur d'une unité à une autre (voir figure 5).



Figure 5: Capteurs de gaz et cheminement de l'air

Il est important de contrôler la température, l'humidité de contrôle, l'humidité relative et des niveaux de point de rosée du moniteur. D'autant plus que dans un espace clos, la présence de trop d'humidité mixte avec des particules de poussière peut contaminer l'environnement et permettre aux polluants biologiques de prospérer.

2.2. Dosage du NO, du NO₂ et du NO_x par l'AQ-Pro

Le moniteur de qualité de l'air intérieur E Instruments AQ-Pro est un dispositif portable à piles, conçu pour être utilisé par un ingénieur / technicien qualifié pour effectuer des mesures de la qualité de l'air dans les bâtiments et les installations.

La grande polyvalence du moniteur de qualité d'air AQ-Pro est en partie due au grand nombre de capteurs disponibles dans un seul moniteur (voir figure 6).



Figure 6: Appareil de mesure AQ-PRO

Ces capteurs sont principalement des capteurs de gaz et peuvent être regroupés en quatre catégories en fonction de leur principe de fonctionnement :

1. Jusqu'à deux capteurs de gaz électrochimiques
2. Un capteur de gaz infrarouges - CO₂
3. Un détecteur d'ionisation photo (capteur de gaz COVs)
4. Capteurs non-gaz (température, humidité, pression, vitesse et pression barométrique)

Tous les capteurs électrochimiques sont montés sur des douilles montées pour faciliter l'installation et le retrait. Le capteur d'oxyde nitrique est un capteur à trois électrodes qui répond à l'oxyde nitrique. Il est équipé d'un filtre intérieur pour éliminer toute interférence d'autres gaz acides. Le capteur d'oxyde nitrique nécessite une tension de polarisation constante pour un bon fonctionnement.

Les paramètres mesurés par les appareils sont pré-calibrés par le constructeur qui livre l'appareil avec les options de mesure demandées. Pour les composés organiques volatiles (COVs) des résultats n'ont pas été obtenues du fait du

manque de sensibilité de l'appareil EVM. Donc la valeur donnée par l'appareil reste 0 (zéro) malgré la présence soupçonnée de COV dans l'air, ou alors l'appareil affiche la mention « ur » signifiant que la concentration ambiante est inférieure au seuil détectable par l'appareil.

Ces appareils nous ont donc permis de mesurer les concentrations des polluants dans l'habitacle des minibus AFTU. Les résultats obtenus avec ces différents appareils sont présentés dans la partie suivante.

PARTIE III
RESULTATS ET
DISCUSSION

1. RESULTAT

L'ensemble des lignes sélectionnées ont coopéré convenablement à l'expérience. Soit un total de 100% de participation.

Pour chaque trajet aller et retour, le même autobus est emprunté. Soit 27 autobus et 27 chauffeurs rencontrés. Le questionnaire a révélé que seul trois (03) des chauffeurs sont des fumeurs et un seul est un ancien fumeur qui a arrêté depuis longtemps. De plus, aucun des chauffeurs n'a déclaré être asthmatique ou ayant de quelconques antécédents de maladies respiratoires. La moyenne d'âge de ces chauffeurs est de 41 ans, avec un âge minimal de 30 ans et un maximal de plus de 50 ans. A ces âges, la durée dans le métier varie de 2 ans à plus de 15 ans, avec une moyenne de 8 ans plus ou moins 2 ans.

1.1. Conditions de voyage et états des véhicules

Parmi les 27 minibus empruntés, les 13 datent de 2005 (date de l'initiation du projet), 05 minibus datent de 2012 et pour le reste l'âge du véhicule est inconnu du chauffeur. Les chauffeurs déclarent tous des pannes fréquentes mais rarement très grave dû aux manques d'entretiens des véhicules. D'autant plus que, d'après les résultats du questionnaire, près de 60% des véhicules ne sont pas équipés de filtres, 32% disent être équipés de filtres et les autres déclarent ne pas savoir si le véhicule est équipé de filtres ou pas. Ces véhicules roulent tous avec un moteur diesel qui a été changé pour seulement deux des 27 minibus.

Sur les 81 voyages prévus dès le départ, 03 voyages étaient inachevés, soit 94,34% de trajet entier accompli. Les routes étant pour la plupart mauvaises et embouteillées, les durées des trajets sont très importantes.

Les durées des trajets d'une station à une autre varient en fonction des événements qui surviennent au cours du trajet ou de la longueur du trajet. Ainsi les durées moyennes des trajets sont exprimées en fonction des lignes dans le tableau V.

Tableau V: Durées moyennes des trajets sur chaque ligne

Lignes	Durée moyenne	Garage	Terminus
31	72 ±10 min	SAHM	PIKINE-TEXACO
38	87 ±14 min	SAHM	GUEDIAWAYE
58	75 ±10 min	SAHM	FASS MBAO
25	63 ±15 min	PETERSEN	PARCELLES
29	92 ± 12 min	PETERSEN	CAMBERENE 2
5	74 ±10 min	PETERSEN	PARCELLES
34	80 ± 14 min	LAT DIOR	NORD FOIRE
1	87 ± 8 min	LAT DIOR	HLM GRAND YOFF
47	123 ± 11 min	LAT DIOR	ALMADIES

Les durées des trajets influencent les durées d'exposition des passagers, plus le trajet est long plus l'exposition est longue et significative.

Certains événements influent sur la durée du trajet et sur les niveaux de pollution. Le nombre de fois que ces événements ont été rencontrés au cours de l'étude et leurs fréquences pour chaque ligne, sur l'ensemble des trajets effectués sur chaque ligne, sont résumés dans le tableau VI.

Tableau VI: Nombre d'évènements rencontrés par ligne

Lignes	Bouchons	Excès Passagers	Accident	Fumées Noires*	Poussières**	Autres	Total
1	27	16	0	4	2	0	49
29	21	22	0	1	0	0	44
5	15	4	1	12	1	3	36
31	14	24	0	7	0	1	46
38	19	24	0	4	1	4	52
34	36	22	1	2	0	1	62
47	33	24	0	10	0	1	68
58	13	32	0	4	0	1	50
25	15	17	0	2	1	0	35
Total	193	185	2	46	5	11	442

*les fumées noires correspondent aux gaz d'échappement denses et noirâtres dégagés par les véhicules à proximité et qui pénètrent par les fenêtres du minibus. **les poussières, quant à eux, sont de types sableux liées au climat désertique de cette période.

1.2.Les concentrations obtenues

Les températures ont varié de 22,5°C à 40,7°C avec une période chaude en fin Novembre et des températures plus basses en Décembre. L'humidité relative quant à elle est passée de 10,5 à 72,3 pendant cette période de transition de l'été à l'hiver.

1.2.1. Les oxydes de carbone

La figure 7 représente les concentrations moyennes de CO obtenues sur chaque ligne sur l'ensemble des trajets allers et retours effectués.

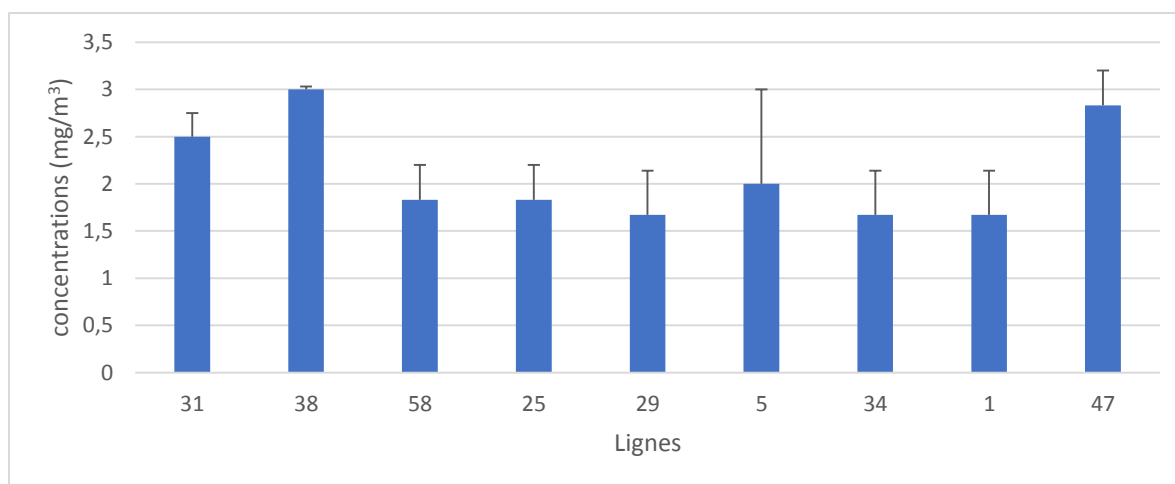


Figure 7: Teneurs en CO retrouvés au cours des trajets.

Les valeurs minimales de CO sont nulles à plusieurs moments de la journée. Les valeurs maximales sont donc obtenues par pics à certaines heures (voir tableau VII).

Tableau VII: Valeurs maximales de CO par ligne

Lignes	Valeurs maximales	Horaires
31	29 ppm	12h – 14h
38	34 ppm	16h -18h
58	10 ppm	12h - 14h
25	18 ppm	16h -18h
29	14 ppm	16h -18h
5	17 ppm	12h - 14h
34	26 ppm	16h -18h
1	21 ppm	12h - 14h
47	24 ppm	16h -18h

La figure 8 représente les concentrations moyennes de CO₂ obtenues sur chaque ligne sur l'ensemble des trajets allers et retours effectués.

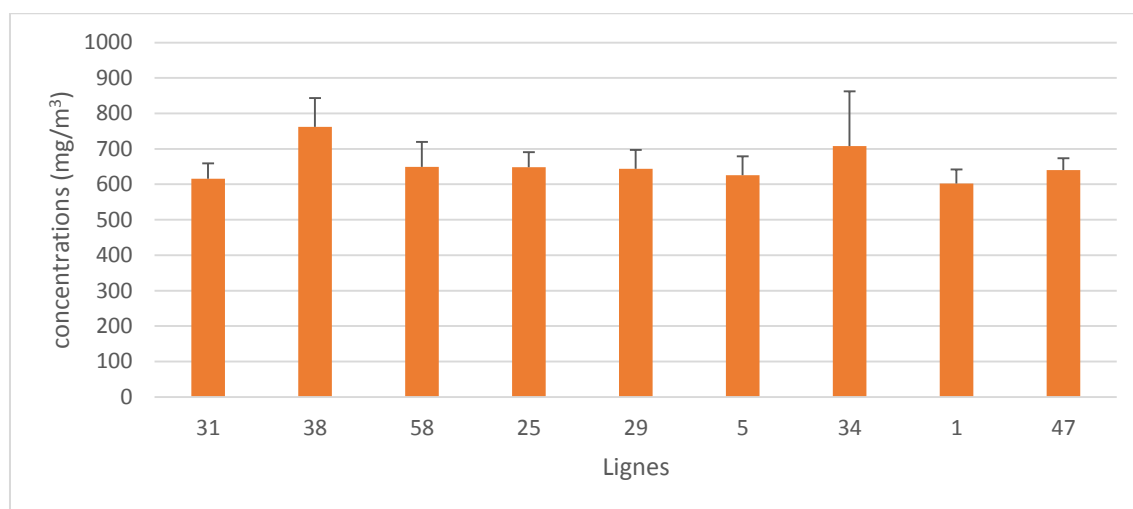


Figure 8: Teneurs en CO₂ retrouvés au cours des trajets

Les valeurs maximales et minimales de CO₂ renseignent sur l'état critique et le maximum de pollution atteint au cours de l'étude sur l'ensemble des trajets effectués (voir tableau VIII).

Tableau VIII: Valeurs maximales et minimales de CO₂ par ligne

Lignes	Valeurs minimales	Horaire	Valeurs maximales	Horaire
31	460 ppm	10h – 12h	1080 ppm	17h - 18h
38	520 ppm	10h – 12h	1640 ppm	17h - 18h
58	485 ppm	14h – 17h	1630 ppm	12h – 14h
25	490 ppm	14h – 17h	1215 ppm	12h – 14h
29	480 ppm	10h – 12h	1210 ppm	12h – 14h
5	490 ppm	10h – 12h	955 ppm	17h -18h
34	475 ppm	14h – 17h	1785 ppm	17h -18h
1	485 ppm	10h – 12h	915 ppm	12h – 14h
47	460 ppm	14h – 17h	1040 ppm	17h -18h

De façon plus détaillée, les concentrations par trajet et par lignes sont présentées dans l'annexe 3.

1.2.2. Les particules en suspension

La figure 9 résume les concentrations moyennes (\pm écart-types) obtenues sur chaque ligne pour l'ensemble des trajets effectués.

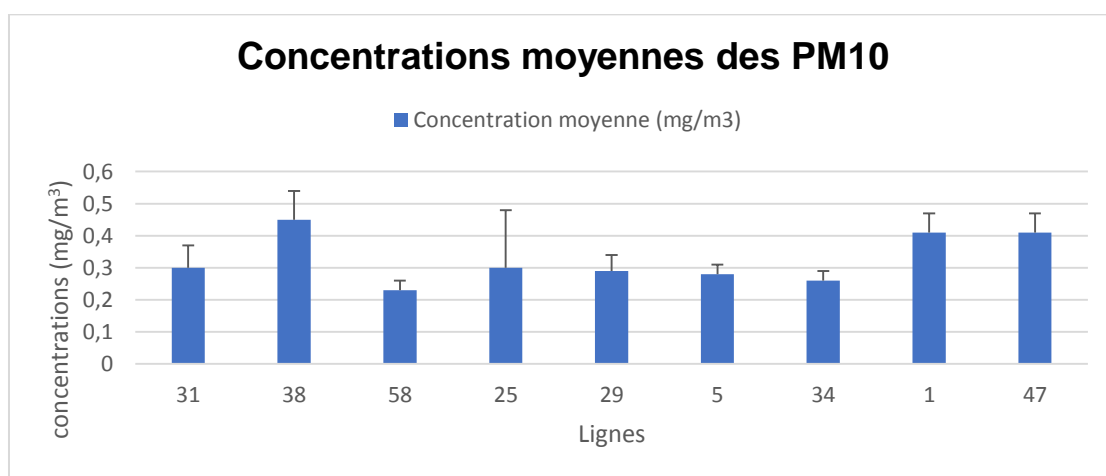


Figure 9: Teneurs en PM₁₀ retrouvés au cours des trajets.

Le tableau IX représente les valeurs maximales et minimales enregistrées sur chaque ligne pour l'ensemble des trajets effectués.

Tableau IX: Valeurs maximales et minimales de PM₁₀ obtenues

Lignes	Valeur minimale (en mg/m³)	Valeur maximale (en mg/m³)
31	0,005	9,67
38	0	4,61
58	0,001	6,76
25	0,006	3,81
29	0,015	2,65
5	0,028	5,74
34	0,010	5,20
1	0,027	12,88
47	0,047	3,76

1.2.3. Les oxydes d'azote

Nous avons les moyennes et les valeurs maximales qui constituent des pics plus clairs de pollution, causées par les mêmes événements que les précédents.

Le tableau X représente les concentrations moyennes des oxydes d'azote obtenues pour chaque ligne sur l'ensemble des trajets.

Tableau X: Concentrations moyennes des oxydes d'azote (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Lignes	NO	NO₂	NO_x
31	647 \pm 544	0,000	647 \pm 544
1	26,1 \pm 35,6	6,3 \pm 15,3	32,4 \pm 36,04
5	628 \pm 507	4,7 \pm 11,6	633 \pm 513
25	45,3 \pm 26,6	7,7 \pm 17,4	53,1 \pm 316
29	136 \pm 181,3	21,6 \pm 53,1	157 \pm 233
34	42,3 \pm 78,1	5,55 \pm 13,6	47,83 \pm 78,03
38	124,2 \pm 117,2	7,55 \pm 16,9	146,6 \pm 99,3
47	769 \pm 557	50,5 \pm 84,1	819 \pm 509
58	59,7 \pm 51,1	5,8 \pm 9,7	65,5 \pm 52,8

Les valeurs maximales traduisent plus spécifiquement les pics observés lors des mesures dans les embouteillages (voir tableau XI). Lors de l'étude, les valeurs minimales d'oxydes d'azote sont nulles sauf lors des pics de pollution (de 7h à 10h et de 16h à 18h) où la valeur devient significative.

Tableau XI: Valeurs maximales d'oxydes d'azote observées par ligne (en mg/m³)

Lignes	NO		NO ₂		NO _x	
	V max	Heure	V max	Heure	V max	Heure
31	1,5	13h - 15h	0		1,5	13h - 15h
38	1,1	13h - 15h	0,2	17h - 19h	1,1	13h - 15h
58	0,4	13h - 15h	0,2	17h - 19h	0,4	13h - 15h
25	0,5	13h - 15h	0,2	17h - 19h	0,5	13h - 15h
29	1,5	13h - 15h	0,6	13h - 15h	1,5	13h - 15h
5	2,5	17h - 19h	0,4	17h - 19h	2,5	17h - 19h
34	0,4	17h - 19h	0,2	17h - 19h	0,4	17h - 19h
1	0,5	17h - 19h	0,3	17h - 19h	0,5	17h - 19h
47	2,2	17h - 19h	0,5	17h - 19h	2,2	17h - 19h

L'ensemble des résultats obtenues lors de cette étude peut être synthétiser dans un tableau des moyennes totales afin d'évaluer le niveau global de pollution dans Dakar (voir tableau XII).

Tableau XII: Etat global de la pollution dans Dakar

	CO (en mg/m ³)	CO ₂ (en mg/m ³)	PM ₁₀ (en mg/m ³)	NO (en µg/m ³)	NO ₂ (en µg/m ³)	NO _x (en µg/m ³)
Moyennes totales	2,11 ± 0,53	655 ± 50	0,33 ± 0,06	275 ± 309	12 ± 15,5	289 ± 315

Tous ces résultats ont permis de comparer le niveau de pollution de Dakar par rapport aux normes internationales et par rapport à d'autres villes du monde à travers d'études similaires réalisées dans ces villes.

2. DISCUSSION

Certains événements, pouvant être rencontrés lors d'un trajet en autobus, influent sur les niveaux de pollution dans l'habitacle du minibus et dans l'exposition des passagers tels que (voir annexe 1) :

- Les conditions climatiques générales qui influent sur le degré d'aération et donc de déplacement des polluants (en cas de vents forts) et sur la quantité de poussière qui pénètre et reste emprisonnés dans l'habitacle (en cas d'épisode de poussières).
- Les embouteillages : qui augmentent considérablement la durée des trajets. Et lors de ces arrêts fréquents, la circulation de l'air dans le véhicule est réduite et les fumées noires de gaz d'échappement des véhicules à proximité pénètrent encore plus dans le minibus.
- Les excès de passagers : les minibus ont tendance à prendre plus de passagers qu'il n'y a de place, ce qui engendre une augmentation de la température, du niveau de CO₂ et d'autres polluants.
- Les odeurs, parfums et fumées de cigarette émanent par les passagers

Au cours d'une étude menée lors d'une thèse soutenue en 2011, une saisonnalité du phénomène de pollution atmosphérique à Dakar a été observée (Pouye, 2012). En effet, la qualité de l'air est globalement bonne durant la période allant du mois de Mai jusqu'à Octobre grâce au phénomène de lessivage des particules dans l'atmosphère et grâce aux pluies qui empêchent leur remobilisation à partir de la surface du sol. Par contre, de Janvier à Mai, une augmentation significative des concentrations des polluants (NO₂, O₃ et PM₁₀) est observée, il en est de même d'Octobre à Décembre où la qualité de l'air est moyenne voire mauvaise à cause des vents chauds et secs du désert.

Parmi les événements rencontrés durant les trajets, les embouteillages sont beaucoup plus fréquents que les autres événements et on peut en rencontrer plusieurs sur le même trajet et de durées variables. Leurs fréquences sur une ligne est fonction du trajet de cette ligne et des heures. En effet, les trajets de

l'après-midi ont enregistré le plus grand nombre d'embouteillages parce qu'ils coïncident avec les heures de descente de la majorité des travailleurs du centre-ville, donc avec un déplacement simultané d'un grand nombre de véhicules de particuliers et de transports en commun pleins de passagers. Toutefois certains axes du trajet de certaines lignes sont plus ou moins embouteillés à tout heure de la journée, tel que les axes du marché HLM, de Grand Médine, de Colobane, de Croisement Cambéréne et autres carrefours très fréquentés.

Comme les embouteillages, les nombres de personne dans les minibus augmentent considérablement entre 15h et 18h, qui correspond à l'heure de descente. Tous ceci contribue à augmenter les niveaux de polluants dans Dakar et la durée d'exposition à ces polluants.

Sur ces lignes de minibus la durée d'exposition est en moyenne supérieur à 01 heure pour un passager quittant la station départ pour la station finale. D'autant plus que la ligne 47 qui a le temps de trajet le plus long s'arrête aux Almadies, hors les Almadies sont plus proches du centre-ville que des terminus comme Fass Mbao ou Cambéréne 2. Les temps de trajets dépendent donc plus des événements rencontrés en cours de route que du kilométrage parcouru.

Les concentrations obtenues lors des trajets peuvent être comparées aux normes en vigueur.

Ainsi, nous constatons que les niveaux de CO et de CO₂ obtenues sont inférieurs à toutes les normes et donc ces valeurs ne sont pas alarmantes. La valeur moyenne la plus haute de CO mesurée en un trajet est de 2,83 mg/m³ qui est une valeur très inférieure à la norme sénégalaise et OMS (30 mg/m³). Les valeurs de CO₂ ne sont définies dans aucune des normes citées ci-dessus.

Les PM₁₀, quant à elles, ont des valeurs moyennes inférieurs à la moyenne annuelle recommandée mais supérieures à la concentration limite sur 24 heures qui est de 260 µg/m³. Par contre les pics de concentrations obtenus (valeurs maximales) dépassent tous la norme sur 24 heures et sont très hautes par rapport aux valeurs moyennes. Cela s'explique par les brusques rafales de vents de sable

entrant par les fenêtres. Nous retrouvons même des valeurs très haute notamment sur la ligne 1 où les concentrations ont atteint jusqu'à $12,87 \text{ mg/m}^3$ soit $12870 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, une valeur plus de 40 fois supérieure à la valeur admise sur 24 heures. Ces valeurs sont d'autant plus significatives que sur le terrain de forts vents de sable rendaient parfois la respiration et la vue difficile et au bout de deux à trois jours de mesures les filtres de l'appareil noircissaient et devaient donc être changer. Au cours de cette campagne de mesure, compte tenu du climat déjà sec et poussiéreux, les particules enregistrées peuvent provenir aussi bien des véhicules que du vent du désert.

Pour les oxydes d'azote, les moyennes en NO_2 mesurées et les pics observés sont tous inférieurs à la valeur limite d'immission par heure. Il faut noter que ces valeurs moyennes ne sont pas obtenues en continue mais plutôt par pics pendant les embouteillages ou plus souvent lors de l'entrée des fumées de gaz d'échappement provenant des véhicules à proximité.

Les valeurs maximales de NO_2 enregistrées sur certains trajets sont sensiblement supérieures ou égales à la valeur limite par heure mais les durées d'exposition à ces pics de concentration sont relativement très courtes (moins de 10 minutes). Par contre, le monoxyde d'azote, qui représente la part la plus importante des oxydes d'azote mesurés, n'a pas de valeur limite prédéfini dans les normes internationales et nationales. Ces faibles valeurs d'oxydes d'azote peuvent s'expliquer par les vents chauds et secs qui favorisent la dispersion des polluants, de plus l'appareil de mesure AQ-PRO effectue une mesure lente et donc par rapport à la vitesse du véhicule peut ne pas capter la concentration totale exacte à chaque minute.

Avec des méthodes différentes et dans des conditions différentes, des études similaires ont été réalisées dans d'autres pays. Une étude similaire, ne mesurant que le CO_2 , a été menée en Taïwan dans les bus et publiée en 2015. Pour les zones de conduite, pendant les trois jours de surveillance, les concentrations minimales de CO_2 trouvées étaient de 408.5, 395.0 et 410.0 ppm et la

concentration maximale était supérieure à 3000 ppm (Chun-fu et *al*, 2015). Les concentrations moyennes quotidiennes étaient comprises entre 1712,2-2102,1, 1194,9-2205,2 et 1056,1-2510,6 ppm lors de cette étude. Ces résultats obtenus à Taïwan, qui est une ville avec une circulation dense, sont similaires aux résultats obtenus lors de notre étude bien que les concentrations maximales soient supérieures à celles que nous avons obtenues.

Une autre étude effectuée en Dehli en 2009 permet de confirmer la variation diurne des émissions de polluants (Pramila et *al*, 2013). Dans cette étude, les heures de pointes se situent de 8h00 à 10h00 le matin et de 17h00 à 19h00 le soir et les émissions de polluants atmosphérique à ces heures sont en moyenne de 56% à 62% des émissions totales de la journée. Le CO, le NO_x et les PM sont émis respectivement à 86%, 27% et 71% en début de journée. Malheureusement dans cette étude les concentrations des polluants mesurés sont exprimées en kg/jour ou en tonne/an, ce qui rend difficile la comparaison avec nos résultats.

Une autre étude menée en 2009 en agglomération rouennaise en France montre une relative homogénéité des concentrations moyennes de NO₂, entre 200 et 300µg/m³, par tronçon trafic parcouru, en dehors du tronçon du tunnel où les données changent à cause du confinement (Morin et *al*, 2009). Ces concentrations de NO₂ sont très élevées par rapport aux concentrations mesurées dans Dakar. Les NO qui sont en moyenne de 560 µg/m³ en agglomération rouennaise sont sensiblement égaux aux NO mesurées à Dakar. Par contre, les particules mesurées sont des PM₁, avec une concentration entre 100 et 200µg/m³ et une moyenne de 98,3µg/m³ en agglomération. Les PM₁₀ mesurées à Dakar ont des concentrations beaucoup plus élevées.

De cette étude, il ressort très clairement que l'habitable de véhicules insérés dans le trafic automobile reste un environnement fortement pollué par les oxydes d'azote et les particules. Mais très peu d'étude ont été effectués dans ce domaine.

CONCLUSION

Les véhicules automobiles sont des microenvironnements soumis à une pollution bien spécifique, dans lesquels nous passons de plus en plus du temps. Les véhicules sont d'une part source eux-mêmes de pollution. Cette pollution peut être due à la combustion du carburant dans le moteur, à l'évaporation du carburant et des fluides, ainsi qu'à l'émission intrinsèque des matériaux qui les composent. Les véhicules sont aussi en contact avec la pollution extérieure, notamment celle engendrée par le trafic au milieu duquel ils circulent.

Les personnes évoluant dans ces microenvironnements sont donc soumises à une exposition plus ou moins importante des polluants issus de la pollution automobile. Ces polluants augmentent lorsque le trafic automobile et le nombre de déplacement augmentent.

Au Sénégal, les transports en commun constituent le mode de déplacement le plus utilisés. Ce sont 80% des déplacements motorisés qui se font par transport public. Les résultats de l'enquête sur les déplacements des Dakarois réalisés par le CETUD, a enregistré près de 1,8 million de déplacements / jour dans les transports publics dont 700 000 (40%) dans le seul département de Dakar où 35% de ces déplacements sont réalisés par les minibus de l'AFTU.

Les minibus de l'AFTU étant donc les plus fréquentés, notre étude a donc été portée sur la mesure du niveau d'exposition des personnes à certains polluants dans ces minibus de l'AFTU communément appelés TATA. Cette étude a été effectuée sur un ensemble de 27 minibus provenant de 03 garages routiers différents avec 81 trajets aller - retour. Ainsi pour un trajet aller ou retour de 63 à 123 ± 15 minutes en moyenne, les concentrations moyennes de NO_x varient de 32,383 à 819,364 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, celles de CO_2 varient de 602 à 708 mg/m^3 , celles de CO varient de 1,67 à 2,83 mg/m^3 et celles des PM_{10} varient de 1,595 à 2,488 mg/m^3 . Avec des pics de concentrations de 0,4 à 2,5 mg/m^3 pour les NO_x , de 915 à 1785 ppm pour le CO_2 , de 10 à 34 ppm pour le CO et de 3,764 à 12,879 mg/m^3 pour les PM_{10} .

Le niveau de pollution des minibus en circulation peut être influencé par certains événements rencontrés en cours de trajet, tels que :

- Les embouteillages qui prédominent en nombres totaux pendant toute l'étude, et qui augmentent les temps de trajets
- Les fumées noires émises par les véhicules à proximité et qui pénètrent par les fenêtres du véhicule
- Les poussières (vents de sables) provenant du climat dominé à cette période par les vents du désert
- Les accidents et autres événements qui ont été plus rarement rencontrés

Les concentrations obtenues dans ces conditions sont presque toutes supérieures aux normes internationales et sénégalaises, à l'exception des concentrations de CO qui restent en dessous des normes.

Les normes étant des valeurs limites définies pour assurer la protection de la santé des êtres humains, leurs dépassements peuvent constituer un risque pour la santé notamment pour les personnes les plus exposées (tels que les chauffeurs et les apprentis) et pour les personnes les plus sensibles (tels que les enfants, les malades, les personnes âgées, les femmes enceintes...).

En effet, plusieurs études ont été menées sur les effets des polluants dus aux automobiles sur la santé. Certains de ces effets ont été à ce jour identifiés ainsi :

- Les oxydes d'azote sont des irritants respiratoires et induisent une hyperréactivité bronchique.
- Les particules inhalées (d'un diamètre de moins de 10 μm) induisent des troubles respiratoires et cardiovasculaires.
- Le monoxyde de carbone, issu de la circulation automobile, se fixe sur l'hémoglobine et peut entraîner des troubles respiratoires, des effets asphyxiants, des maux de tête, et des troubles cardiaques.

- Le dioxyde de carbone n'est pas toxique mais peut entraîner des phénomènes de suffocation et/ou d'évanouissement chez les personnes sensibles.

L'air étant toutefois composé d'un ensemble plus complexe de gaz et de particules, non séparables en pratique quotidienne, le principe de spécificité est donc difficile à démontrer car les différents travaux n'ont pas nécessairement utilisé les mêmes mesures de polluants ou ont été effectués dans des conditions expérimentales parfois variables. Quoiqu'il en soit, on notera que les effets de la pollution sont probablement d'origine multifactorielle comme dans toute exposition environnementale.

Davantage de recherches sont donc nécessaires, particulièrement pendant les toutes premières périodes de la vie où les facteurs secondaires sont presque nuls, afin de déterminer l'impact réel de la pollution sur la santé de l'être humain à court et long terme.

Afin de diminuer le niveau de pollution à Dakar, des solutions pourraient être adoptées, notamment le renouvellement du parc automobile, l'élargissement des voies dans le but de diminuer les embouteillages et le contrôle rigoureux de la présence de filtres des véhicules entrants dans le territoire. A cet effet, le centre de contrôle technique devrait vérifier la présence et l'état des filtres avant d'autoriser la mise en circulation des véhicules.

Des études supplémentaires pourraient être menées aux niveaux des stations routières et dans les véhicules de particuliers à Dakar.

REFERENCES

1. ADEME. *Emissions de particules et de NOx par les véhicules routiers*. Les Avis De L'ADEME. Juin 2014. p2-6
2. ALLAIN Y.-M., ROCHE N., HUCHON G. Pollution atmosphérique, facteur de risque des BPCO. *Revue française d'allergologie* : juillet 2010, n°51, p41-55
3. Air Quality Guidelines for Europe. *WHO Regional Publications*. European Series, No. 91. 2000. Disponible sur : https://www.airparif.asso.fr/_pdf/normes-oms-2000.pdf
4. BLIEFERT C., PERRAUD R. Chimie de l'environnement : air, sol, eau et déchets. Tome 2. Edition DE BOECK. 2011. 478p
5. BOUSSOUARA K. *Etude des émissions polluantes et des moyens de dépollution dans les moteurs à combustion interne*. Doctorat en science en génie mécanique. Algérie : Université de Constantine, 2010, 211p
6. CHUN-FU C., MING-HUNG C., FENG-HSIANG C. Carbon Dioxide Concentrations and Temperatures within Tour Buses under Real-Time Traffic Conditions. *Plos one 10(4) /journal.pone.0125117*: Avril 2015, 12p.
7. DONATI S.-Y., GAINNIER M., CHIBANE-DONATI O. Intoxication au monoxyde de carbone. *EMC - Anesthésie-Réanimation* : Vol 2, 2005, p 46-67.
8. DOMINICI F., MCDERMOTT A., DANIELS M., ZEGER SL., SAMET JM. Revised analyses of the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study: mortality among residents of 90 cities. *J Toxicol Environ Health A*: 2005, p68(13-14) p1071-92.
9. Effets de la pollution sur la santé. *En ligne*. Citation : 21/04/2017. Disponible sur : <https://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-sante>
10. ELICHEGARAY C., BOUALLALA S., MAITRE A., BA M. État et évolution de la pollution atmosphérique. *Revue française d'allergologie* : septembre 2009, n° 50, 381-393p

11. FINTZ E. *Recrudescence d'asthme et pollution atmosphérique*. Faculté des sciences pharmaceutiques. Toulouse (France) : Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2014, 91p
12. GERIN M., GOSSELIN P., CORDIER S., VIAU C., QUENEL P., DEWAILLY E. Chapitre 11 : Qualité de l'air ambiant. **In** : *Environnement et santé publique : fondements et pratiques*. Editions TEC&DOC. Canada : Edisem, 2005, 1009p
13. KÜNZLI N, ACKERMANN-LIEBRICH U, BRÄNDLI O, TSCHOPP JM, SCHINDLER C, LEUENBERGER P. Clinically “small” effects of air pollution on FVC have a large public health impact. *Swiss Study on Air Pollution and Lung Disease in Adults (SAPALDIA)*. *Eur Respir J*: 2000, n°15, p131–6
14. Les directives européennes. En ligne. Citation : 21/04/2017. Disponible sur : <https://www.airparif.asso.fr/reglementation/normes-europeennes>
15. Les recommandations de l'OMS. En ligne. Citation : 21/04/2017. Disponible sur : <https://www.airparif.asso.fr/reglementation/recommandations-oms>
16. MASCLET P. *Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives*. Ellipses éditions. Paris : 2005, 213p
17. MEDINA S. *La surveillance des risques liés à la pollution atmosphérique extérieure*. Session Polluants de l'air : InVS, Juin 2015, #JPSP15, 45p
18. MORIN J.-P., GOURIOU F., PRETERRE D., BOBBIAC M., DELMAS V. Evaluation de l'exposition aux polluants atmosphériques des conducteurs de véhicules automobiles par la mise en œuvre de mesures dynamiques dans l'habitacle du véhicule. *Elsevier Masson* : 2009. 70 : 184-192
19. NALBONE G. Air pollution by fine and ultra-fine particulate matter and cardiovascular risk. *Médecine & Longévité* : 2010, n°2, 22-39p
20. NORME SENEGALAISE NS 05-062. Octobre 2003. Code de l'environnement

21. OCDE. *Les conséquences économiques de la pollution de l'air extérieur*.
Rapport L'ESSENTIEL STRATEGIQUE : Juin 2016. 17p
22. OMS. Synthèse de l'évaluation des risques. *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre*.
Mise à jour mondiale 2005. Disponible en ligne sur :
https://www.airparif.asso.fr/_pdf/normes-OMS-revision-2005-resume-2006-VF.pdf
23. PRAMILA G., DHIRENDRA M. AND ANIKENDER K. Vehicular
emission inventory of criteria pollutants in Delhi. *Goyal et al. SpringerPlus*
2013, 2:216
24. POUYE B. A., *Prévalence de certaines affections respiratoires dans la
région de Dakar : corrélation avec le niveau de pollution de l'air
atmosphérique*. Doctorat en pharmacie. Dakar (Sénégal) : Faculté de
médecine et de pharmacie, juillet 2012, 107p
25. CETUD. Rapport annuel 2015. *La mobilité pour tous, à moindre coût et en
toute sécurité*. Ministère des Infrastructures, des Transports Terrestres et du
Désenclavement.
26. ROCHAT T., BRIDEVAUX P.-O., GERBASE M., PROBST-HENSCH N.,
KÜNZLI N. Quel est le rôle de la pollution atmosphérique dans l'asthme ?
Revue Médicale Suisse : novembre 2012, n°8, p2233-6
27. ZUBER A. Pollution atmosphérique : effets à long terme. *Extrapol* :
Septembre 2006, vol 29, n° 190, page 3

SERMENT DE GALIEN

Je jure, en présence des Maîtres de la Faculté, des Conseillers de l'Ordre des pharmaciens et de mes Condisciples.

D'honorer ceux qui préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer, dans l'intérêt de la Santé Publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'Honneur, de la Probité et du Désintéressement.

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine.

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

PERMIS D'IMPRIMER

Vu :
Le président du jury

Vu :
Le Doyen.....

Vu et Permis d'imprimer
Pour le recteur, le Président de l'assemblée d'Université Cheikh Anta Diop de Dakar et par
délégation
Le Doyen