



**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE ALIMENTAIRES ET SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**IMPACT DES FOURS DE CHARBON DE BOIS SUR LA
POLLUTION ATMOSPHERIQUE PARTICULAIRE DANS
LA REGION DE MISANSA-KINSEVERE (LUBUMBASHI-
HAUT-KATANGA)**

Par MUJINGA ILUNGA Cathy

*Mémoire de Fin de cycle présenté en vue de
l'obtention de grade de licencié en Sciences de
l'environnement*

Novembre 2021

RESUME

La protection de l'environnement est un défi qui demande l'implication de tous les acteurs à tous les niveaux. Bien qu'elle soit une source principale d'énergie, la production de charbons de bois cause plusieurs dégâts environnementaux préconisant ainsi la qualité du milieu naturel, rendant ainsi impropres les conditions de vitales. Malgré ces enjeux, la production de charbon constitue l'une des activités principales de la population environnante la ville de Lubumbashi, en l'occurrence celle du village Misansa dans sur l'axe Kinsevere, où ces producteurs ne sont initiés aux approches de gestion durable de l'environnement, ce qui semble causer ainsi la dégradation du milieu naturel par l'émission des particules dangereuses.

C'est pourquoi il a été utile d'initier une démarche scientifique visant à percevoir l'ampleur de la combustion du charbon de bois sur l'émission de particules PM2.5 et PM10 dans les zones de production. Cette tâche s'est étend sur la comparaison des concentrations entre différentes zones de prélèvement, l'évaluation de l'évolution journalière des concentrations et la cartographie de la dispersion des particules dans l'atmosphère.

Pour y arriver, les prélèvements des particules ont été réalisées à l'aide d'un capteur laser de type Trotec bq20, au sein des trois types de sites, notamment, les sites des fours actifs, les sites des non actifs et un témoin des sites sans fours. Les données collectées ont été saisies grâce au tabulaire et traitées grâce aux logiciels R.

Les fortes concentrations de particules PM2.5 et PM10 ont été enregistrées proches des fours actifs en comparaison des zones sans four et zones des fours inactifs. L'ensemble des zones de prélèvement ont révélé des concentrations de particules au-dessus du seuil normal de l'OMS, signifiant ainsi une présence de pollution atmosphérique en ces particules. L'évolution journalière de cette émission s'est révélée irrégulière, avec certains moments de la journée qui ont semblé à être plus favorable au regard des autres. Le rapprochement des sources de production (fours) influence considérablement l'augmentation des particules PM2.5 et PM10.

Etant d'un côté une incontestable source d'énergie et de l'autre côté un facteur dégradant l'environnement, la combustion des charbons de bois dans le contexte local doit intégrer des approches de gestion intégrée de l'environnement pour permettre une préservation des conditions naturelles de vie. Ainsi, les acteurs doivent être initiés à des pratiques de production durable.

Mots clés : fours, charbon, particules, concentrations, pollution.

Introduction

Le charbon de bois est la principale source d'énergie dans les pays en voie de développement et sa consommation continue de croître sur le continent africain (Binzangi et al, 1994). Dans le monde, plus de 2,5 milliards de personnes dépendent des combustibles tirés de la biomasse pour satisfaire leurs besoins en énergie. Cette forte dépendance à l'égard du charbon de bois s'observe en Afrique sub-saharienne où 93% de la population rurale et 58% de la population urbaine dépendent de la biomasse comme combustible (IEA, 2006). Par ailleurs le bois énergie continue de représenter la plus grande partie de l'exploitation forestière en Afrique (selon les estimations, la production du bois énergie se situe à 589 millions de m³ en 2006), soit 90% de la production totale des produits du bois en RDC (FAO, 2007 ; FAO, 2009).

La pression sur la forêt est telle que certaines provinces du pays sont très dépourvues en produits ligneux pour satisfaire le besoin en énergie de cuisson d'une part et pour des bois de construction et de bois d'œuvre d'autre part. C'est le cas de la ville de Lubumbashi qui était avant sa fondation en 1910, couverte par la forêt claire du type Miombo mélangé aux lambeaux résiduels de la forêt dense sèche et aux îlots de la forêt galerie. Actuellement plus de 80% de ces forêts ont disparu comme l'affirme Assani (2007). La FAO estime cette déforestation à 155.000 à 170.000 ha/an, en zone de forêt claire et de savane boisée et 50% environ de cette déforestation résultent du prélèvement de bois de feu (Ministère du plan, 2010). Malgré la forte pression exercée sur la forêt, la demande en bois comme source d'énergie est toujours croissante. Elle serait attribuée au manque d'énergies alternatives, au mauvais état des services d'électricité et infrastructures électriques du pays, au faible développement du secteur industriel du pays ainsi qu'aux mutations actuelles d'origines démographiques et socioéconomiques du mode de vie (Ministère de l'énergie, 2009 ; Mayumbe, 2010).

En effet, le trafic de bois est un des corollaires de la croissance démographique et est pointé dans quelques études comme responsable des émissions des polluants atmosphériques composés entre autre des matières particulaires (appelées PM10, PM2.5, etc. en fonction de leur diamètre aérodynamique), connu pour leurs effets sur la santé qui deviennent de plus en plus nuisible. Ces polluants sont souvent émis dans les gaz, les fumées ainsi que les poussières (Banza, 2021 ; Gonnet, 2003, Bury, 2008). Ceci fait appelle à la notion de la pollution atmosphérique, la pollution de l'air constitue un des problèmes graves sur l'environnement dans plusieurs villes à travers le monde. Il a été constaté depuis le 19ème siècle une augmentation sans cesse de la concentration de particules en suspension (PM10 et PM2,5) (Hadfield, et al., 1999 ; Quénel, 1997).

À la base dans certaines villes les émissions de cette pollution étaient principalement celles du soufre et des fumées noires, dues à l'utilisation du charbon dans les maisons et les industries et dans d'autres villes l'activité minière en est la cause. La pollution de l'atmosphère est considérée dans plusieurs études comme étant un important facteur de risque pour la santé et l'environnement (Zanatta M et al, 2011 ; A.European, 2016). Les milieux urbains sont les plus exposés avec la forte croissance démographique qui s'y observe, cas de plusieurs pays d'Afrique (Bahino J, 2018).

Ces matières particulaires ou particules en suspension (PM) peuvent pénétrer très loin dans les poumons, justement parce qu'elles sont fines. Elles peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et pénétrer dans le sang. C'est qui fait d'eux l'un des polluants atmosphériques importants dont l'une des principales sources anthropiques en milieu rural est le trafic de bois. En effet, lors de leurs émissions dans l'atmosphère les PM peuvent véhiculer de nombreuses substances néfastes (Sun Z et al, 2017).

Il est a noté que les PM sont aussi considérées comme les plus dangereuses en raison de leur long temps de suspension dans l'air et par le faite que plus c'est petit plus ça va loin cela entraine la capacité à pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire (Naser, 2008).

Ainsi d'un côté, le charbonnage cause plusieurs dégâts au niveau de l'écosystème, en causant un déséquilibre par la déforestation, accompagnée des plusieurs dommages qui y sont associés, de l'autre côté il est à la base de plusieurs problèmes sanitaires, en l'occurrence de la libération des particules dangereuses pour la santé (cas échéant). Malgré ces effets multidimensionnels dans le sens dévastateur, très peu d'étude, si ce n'est aucune à notre connaissance n'ont traité de la pollution de l'air causée par les particules provenant des fours de charbon. Cette problématique se résume par : (i) quelle est la teneur de ces particules nocives dans l'atmosphère ? (ii) comment évolue la concentration de ces particules dans l'atmosphère ; et enfin, (iii) quelle est la distribution spéciale de ces particules dans l'atmosphère.

Cela étant, pour répondre à ces question cette étude s'assigne pour **objectifs général** d'évaluer l'impact des activités des fours de charbon de bois sur la pollution atmosphérique particulière au Village Misansa dans la région de Kinsevere (Lubumbashi-Haut-Katanga). Ainsi spécifiquement, il sera question :

- Quantifier les particules PM2.5 et PM10 dans l'atmosphère au sein différents zones de prélèvement sites d'étude ;

- Déterminer l'évolution journalière de la concentration en PM2.5 et PM10 dans l'atmosphère au sein des zones de prélèvement ; et fin
- Cartographier la distribution spatiale de la concentration en PM2.5 et PM10 dans l'atmosphère dans le milieu étudié.

Pour atteindre ces objectifs, il revient hypothétiquement de penser que (i) les sites des fours actifs présenteraient des teneurs élevées des particules en comparaison des sites des fours non actifs et sans fours, (ii) certains moments de la journée semblent favoriser considérablement l'augmentation de l'émission des particules dans l'atmosphère, et enfin, (iii) le rapprochement des fours en activités serait un facteur favorisant la disponibilité des particules dans l'atmosphère.

Pour vérifier ces hypothèses, les prélèvements des particules ont été réalisées à l'aide d'un capteur laser de type Trotec bq20, au sein des trois types de sites, notamment, les sites des fours actifs, les sites des non actifs et un témoin des sites sans fours. Les données collectées ont été saisies grâce au tableur et traitées grâce aux logiciels R.

Outre l'introduction et la conclusion, ce travail est structuré en 4 chapitres, notamment le premier qui est consacré à la revue littérature ; le deuxième décrit en détail la méthodologie et le milieu d'étude ; le troisième présente les résultats et en fin le quatrième (dernier) discute les résultats.

Chapitre 1 : Revue de la littérature

Dans ce chapitre l'objectif globale est de parler brièvement de la pollution atmosphérique vue d'un angle physique (particules). Dans cette optique nous décomposons ce chapitre de la façon suivante : définition de quelque concept (air, atmosphère, particule, aérosol) dans un premier temps. Dans la deuxième partie nous parlerons de l'introduction à la pollution atmosphérique.

1.1 Définition de quelque concept

1.1.1 L'air

D'après le dictionnaire Larousse l'air est un fluide gazeux qui constitue l'atmosphère, indispensable à la vie car il intervient au processus de la respiration. Il est constitué de plusieurs gaz, dont deux gaz sont principaux l'oxygène 21% et l'azote 78%. Le 1% restant est l'ensemble d'argon, de gaz carbonique, d'ozone, d'hydrogène, d'hélium ainsi qu'une fraction de la vapeur d'eau et de particules solides en suspension (OUZID, 2017)

1.1.2 L'atmosphère

L'atmosphère est un fluide rare, transparent, compressible et élastique qui enveloppe le globe terrestre. Pierre Simon de Laplace, définit l'atmosphère comme étant un ensemble de couches, principalement gazeuses, qui entourent la masse condensée, solide ou liquide, d'une planète (Laplace, 1797).

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse, entourant la Terre, constituée d'air. L'air se compose à 78,1 % de diazote, à 20,2 % de dioxygène, à 0,9 % d'argon, à 0,1 % de dioxyde de carbone, et de traces d'autres gaz. Cette atmosphère se compose de différentes couches qui sont : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère (couche au-delà de la thermosphère) (Naser, 2008).

Il y a deux basses couches dans l'atmosphère appelée troposphère et stratosphère. C'est dans ces couches que se déroulent essentiellement des phénomènes météorologiques, les activités aéronautiques ainsi que la concentration maximale de polluants atmosphériques (Assani, 2007).



Figure 1.1: Différentes couches atmosphériques, source météo France.

1.1.3 Pollution

La pollution est la dégradation d'un milieu naturel par des substances chimiques, des déchets industriels ou ménagers mais aussi comme la dégradation de l'environnement humain par une ou plusieurs nuisances.

La pollution est clairement définie par la loi portant principes fondamentaux relatifs à la protection de l'environnement en République Démocratique du Congo comme étant l'introduction directe ou indirecte, par l'activité humaine, de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé ou à la qualité de l'environnement, d'entraîner des détériorations aux biens matériels ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier (Ozer P, 2003).

En outre, la pollution est une diffusion dans l'environnement d'un produit potentiellement toxique ou de nature à perturber le fonctionnement d'un biotope. Elle est aussi une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît comme le sous-produit d'une action humaine, par des effets directs ou indirects (Stassen, 2002).

1.1.4 Polluant

Un polluant est toute substance d'origine naturelle ou anthropique qui s'accumule dans le sol (sol, sous-sol ou eau souterraine) et/ou dans l'air par suite de l'activité humaine et qui est susceptible de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité de l'environnement. (Larousse, 2018)

Le polluant est défini par la loi sur l'environnement en République Démocratique du Congo comme un élément ou un rejet solide, liquide ou gazeux, tout déchet, odeur, chaleur, son, vibration, rayonnement ou combinaison de ceux-ci susceptibles de provoquer une pollution

1.1.5 Pollueur

Selon la loi de l'environnement en République Démocratique du Congo un pollueur est toute personne physique ou morale responsable de la pollution (Stassen, 2002).

1.1.6 La Pollution atmosphérique

La pollution de l'air est définie comme étant le résultat de l'émission de déchets et de produits toxiques dans l'atmosphère (larousse, 2018). Ainsi, la pollution atmosphérique est considérée comme étant responsable d'environ 800 000 décès prématurés chaque année dans le monde. L'augmentation de polluants est aussi à l'origine des phénomènes de pluies acides qui ont un impact négatif sur la végétation (Arquès, 1998).

C'est travail s'est focalisé sur la pollution due aux la présence de particules dans l'atmosphère.

1.2 Généralités sur les activités de charbon de bois

La biomasse principalement à travers le bois est une source d'énergie pour les hommes depuis la nuit des temps. En premier, le bois fut utilisé pour cuisiner et rendre les aliments plus digestibles, mais aussi réchauffer les maisons (Coelho, 1982).

La durabilité de l'approvisionnement en bois énergie des principales villes d'Afrique Centrale, et celles de la RDC en particulier, va dépendre entre autres de la légalité de leurs pratiques et de leur solidité institutionnelle. Il sera analysé ici comment le régime forestier pose les bases d'une gestion naturelle des ressources ligneuses. Au plan historique, la gestion de la biodiversité forestière que recèle la RDC était régie jusqu'au mois d'Août 2002, par le décret colonial du 11 avril 1949 portant régime des forêts. Il faut souligner que le texte de 1949 s'est avéré dépassé par rapport aux nouvelles tendances conceptuelles de la gestion forestière issue du Sommet de Rio en 1992. A cet effet, la loi N° 11- 2002 portant Code forestier en RDC du 29 août 2002 est venue opportunément s'ajuster à la nouvelle donne (Nge,2012).

1.2.1 Intervention de l'Etat dans la production de charbon de bois

Actuellement, l'Etat congolais n'a pas de politique bien définie pour gérer la filière du charbon de bois et les problèmes environnementaux qu'elle pose. Si le nouveau Code Forestier a défini un « permis de coupe de bois de feu et de carbonisation », les procédures pour les obtenir et les institutions étatiques impliquées sont moins transparentes. A ces permis s'ajoute toute une série

de permis officiels et officieux qui sont exigés de façon aléatoire par des agents étatiques sur le terrain. Ceci renforce l'ambiguïté et le règne de l'arbitraire dans le secteur du charbon de bois (Hendricks, 2009). A Lubumbashi, il existe actuellement deux services étatiques qui interviennent régulièrement dans la filière à savoir :

- ✚ Le Service de l'Environnement à l'étape de la production, il délivre un permis d'abattage et perçoit une taxe de carbonisation pour les concessionnaires qui produisent du charbon de bois sur des superficies de plus de deux hectares.
- ✚ Le Service de l'Energie est appelé à percevoir la taxe sur autorisation de construction des fours à charbon de bois de type traditionnel et de type amélioré. Néanmoins, sur terrain ce service n'est que peu présent et reste inconnu chez les acteurs de la filière des charbons de bois (Nge,2012).

1.2.2 Production De Charbon De Bois Comme Première Etape de la filière

La plupart d'études sur le bois énergie en général ou de charbon des bois en particulier recourent à l'approche filière. Il est alors difficile d'aborder la question de production sans analyser ce concept. Le mot « filière » est la traduction française du concept de « commodity chain », ce qui signifie généralement « la série de relations à travers lesquelles un produit passe à partir de son extraction, sa conversion, son échange, son transport, sa distribution et son utilisation finale » (Ribot, 1998). La filière peut être très organisée et contrôlée par des autorités locales en l'absence d'une administration étatique. Bien qu'Arnold et al. (2006) affirment que la plupart des filières en bois-énergie sont assez équitables (Boberg, 2000 ; Remedio, 2002 ; Wunder, 1996), les marchés du charbon de bois en Afrique en particulier peuvent atteindre des dimensions assez complexes, développer des caractéristiques de contrôle hiérarchique (Ribot, 1998 ; Townson, 1995) et s'étendre jusqu'à mille kilomètres de la ville (Kammen & LEW, 2005). Ce sont des systèmes complexes dans lesquels certains acteurs ont pu développer des stratégies de contrôle du marché.

En RDC La filière de charbons de bois dans les villes de Kisangani, Kinshasa et Lubumbashi sont de systèmes similaires à ceux décrit par le SEI. Elles sont formées de petits acteurs qui n'ont aucun contrôle sur la filière. Les charbons de bois constituent la principale source de revenu pour les producteurs (Schure, 2010 ; Hendricks, 2009). A Kinshasa certains producteurs sont regroupés au sein d'une plateforme leur permettant de s'organiser et de produire de fois de grande quantité de braise. Au niveau du transport, certain pôle de pouvoir est constitué suite au revenu considérable des acteurs. Le bois passe par plusieurs étapes pour devenir charbon bois entre autre la carbonisation et la combustion des gaz

1.2.2.1 Carbonisation

La carbonisation est un processus chimique, appelé pyrolyse ou dégradation thermique, lors duquel un matériel organique est décomposé en une variété de substances, desquelles le charbon de bois est le plus important. Ce processus n'est possible que dans des circonstances de température élevée et de manque relatif d'oxygène. En cas de présence d'oxygène la combustion se réalise et les charbons de bois se transforment en cendre (Foley, 1986). Le processus de la production de charbon de bois commence bien évidemment avec la collecte du bois qui est alors haché en pièces. Puis, on construit un four de carbonisation en terre, en briques ou en tonneaux en acier. Alors, on y empile de 1 à 5 tonnes de bois coupé et on allume le four pour commencer le processus de la carbonisation. Bien que le four soit toujours bien fermé, on y laisse quelques trous pour permettre l'évacuation de la vapeur et des fumées produites. Si ces émissions changent de couleur, de plus en plus de trous sont fermés pour assurer une pyrolyse de bonne qualité. Quand le four est éteint, il est ouvert et on ramasse le charbon de bois pour le mettre dans des sacs. Selon Foley (1986), tout ce processus peut durer jusqu'à deux semaines lors desquelles une moitié de l'énergie est perdue.

Les activités de carbonisation représentent une source de revenu importante pour les agriculteurs bien que la basse productivité du travail limite en réalité les voies vers l'enrichissement (Coomes & Burt, 2001). Les méthodes de production traditionnelles ont une efficacité faible de l'ordre de 15 à 25%. Cette inefficacité dépend de la construction du four, l'humidité du bois, l'espèce d'arbre, l'empilement du bois et l'aptitude du charbonnier (Kammen & Lew, 2005, Girard, 2000). Par ailleurs la qualité de charbon de bois produit dans un même four est variable suite à la difficulté de maintenir une carbonisation uniforme dans la totalité du four. En plus, cette méthode ne produit pas mal de substances chimiques volatiles qui nuisent à la santé et à l'environnement. Les fours améliorés en briques produiraient un kg de charbon avec 6 à 8 kg de bois seraient moins consommateurs en main-d'œuvre, mais coûteraient plus chers (Stassen, 2002).

1.2.2.2 la combustion des gaz

La deuxième étape est la combustion. Ici les goudrons contenant majoritairement des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ne brûlent pas directement. Ils partent avec les fumées et pour être éliminés, ils doivent être filtrés ou craqués par traitement catalytique durant ou après cette combustion. Les micro-fragments de charbon imbrûlé forment des particules fines classées en trois catégories. La température de combustion varie en fonction du taux d'humidité du bois et de la quantité d'air en excès. Plus le bois est humide et plus la température

de combustion sera faible, avec formation de goudrons dans les fumées, donc de pollution. Plus le bois est sec, plus complète est la combustion avec peu de particules de charbon imbrûlé et moins il y a formation de goudrons (Donnot, 2004).

1.2.3 Impacts sur l'environnement

D'un point de vue environnemental, les impacts du charbonnage sont entre autres : la rareté de bois à couper c'est-à-dire la déforestation, la réduction de la production des PFNL (Produit Forestier Non Ligneux), la perturbation climatique, l'érosion, la baisse de la fertilité du sol et du rendement agricole, la raréfaction des gibiers. D'une manière générale toutes les ressources de la forêt sont en déclin, menaçant ainsi la sécurité alimentaire des populations. Au moment où la forêt disparaît, il y a diminution de toutes les ressources non ligneuses. Quand on a rompu l'équilibre, que la forêt s'est dégradée, les revenus des paysans baissent et, même si les forêts sont remplacées par des champs, la productivité va baisser parce que la fertilité du sol diminuera également. De ce fait, les paysans doivent pratiquer des cultures plus loin. Le citadin s'appauvrit aussi parce que consommer ce bois de chauffe est coûteux. Plus le citadin est pauvre, plus il va payer la braise très chère parce qu'il achète de petites quantités. C'est l'utilisation de l'électricité finalement qui pourrait permettre de diminuer ce besoin en bois. Si non, on est dans la spirale croissante de pauvreté du citadin (Anonyme, 2007 ; Ngalya, 2010).

1.2.3.1 Déforestation

La déforestation c'est la destruction de la forêt sur une grande superficie, en vue d'utiliser différemment le terrain. L'abattage des bois d'œuvre est l'une des causes de la déforestation. Il convient de faire la différence entre déforestation et dégradation des forêts. Cette dernière se manifestant par une atteinte à la qualité des milieux forestiers. Ces deux phénomènes sont liés et sont la cause de problèmes divers (Encarte, 2008).

A Lubumbashi, avant la fondation de la ville en 1910, tout le degré carré était couvert par la forêt claire (Miombo) mélangée aux lambeaux résiduels de la forêt dense sèche (Muhulu) et aux îlots de la forêt galerie. Actuellement, plus de 80% de ces forêts ont disparu. Ce qui correspond à une superficie d'environ 10000 km² (PDEZA, 1994).

1.2.3.2 Emissions de particules en masse

Dans le premier cas il s'agit de la différence de masse de particules impactée sur un filtre sur un delta de temps défini. Elles représentent, en masse, plus de 70% des particules émises (Dekati, 2018). Les émissions de particules sont également influencées par la température du

four de combustion. En effet, à plus faible température, la combustion se retrouve limitée et conduit ainsi à la formations d'imbrulés (Brandelet, 2016).

1.3 Notions introductives sur les particules atmosphériques

1.3.1 Particule atmosphérique

L'OMS définit les particules atmosphériques ou les matières particulaires comme étant des polluants atmosphériques constituant un mélange de substances organiques et minérales en suspension dans l'air, sous forme solide ou liquide (aérosols hygroscopiques) (OMS, 2005 ; André, 2012). Ces particules sont de tailles, de compositions et d'origines diverses. Le terme de particules désigne en général la fraction des composants liquides ou solides en suspension dans un milieu gazeux. (Monga, 2021) Leurs propriétés se définissent en fonction de leur taille particulaire qui est égal au diamètre d'une sphère de masse volumique 1 g.cm^{-3} (AFNOR, 1985).

On les appelle également « poussières » un terme désignant toutes les particules de matière en suspension dans l'air ambiant ou « aérosols » ou encore « Particulate Matter (PM) ». Il s'agit d'un mélange complexe de petites particules solides et liquides. C'est le seul polluant atmosphérique pour lequel aucune définition chimique n'est utilisée par le fait qu'il a une vaste gamme de composition physico-chimique (Katrien et al, 2009).

Du point de vue toxicologique on parle de particule par le fait qu'ils ont du potentiel de pénétration dans l'appareil respiratoire (Goulaouic, 2009).

1.3.2 Classification des particules selon leurs tailles

Selon leur taille on distingue 4 types de particules (C.E., 2008 ; Donaldson & Stone, 2003 ; Choi et al., 2004 ; Macnee et al., 2003 ; Geiser et al., 2005) :

- PM 10 dont le diamètre est inférieur à $10 \mu\text{m}$, appelées « grosses particules » ils peuvent pénétrer dans l'appareil respiratoire jusque dans les voies aériennes supérieures ;
- PM 2.5 dont le diamètre est inférieur à $2,5 \mu\text{m}$, appelées « particules fines » ils peuvent parcourir l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires ;
- PM 1 dont le diamètre est inférieur à $1,0 \mu\text{m}$, appelées « particules très fines » ;
- PM 0,1 dont le diamètre est inférieur à $0,1 \mu\text{m}$, appelées « particules ultrafines » ou nanoparticules à cause de leur taille, inférieure aux structures cellulaires, ils ont la capacité de pénétrer jusqu'au niveau de cellule.

La figure 1.2 montre une comparaison entre des particules fines et un cheveu humain et pour le cheveu la taille est de 50-70 μm et est plus petite comparativement au sable. Le PM10 le diamètre inférieure est à 10 μm et le PM2.5 le diamètre est inférieure à 2.5 μm .

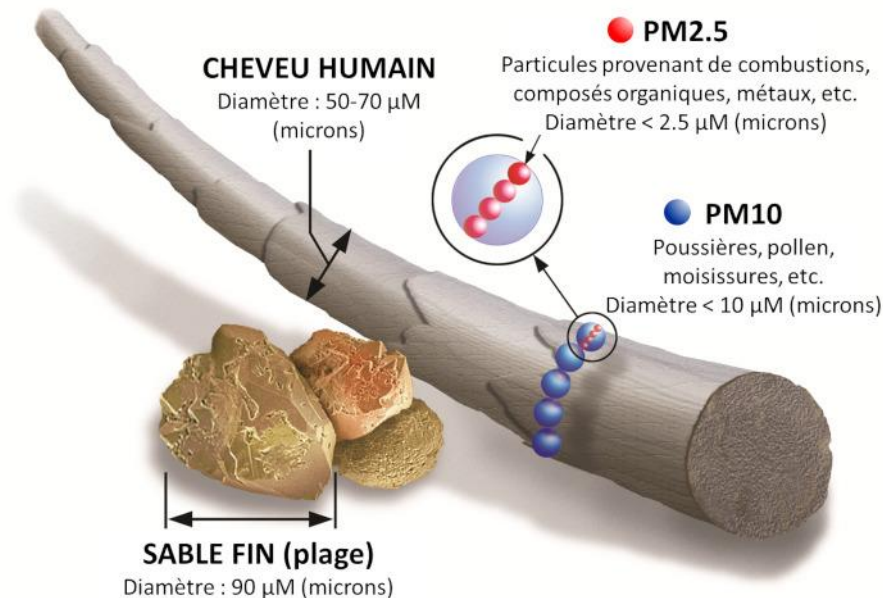


Figure 1.2 Comparaison de diamètres entre un cheveu, un grain de sable et des particules PM2,5 et PM10.

1.3.3 Sources des polluants particulaires atmosphériques

Les sources des particules atmosphériques peuvent être d'origine naturelle ou anthropique (Arquès, 1998 ; ORS, 2007 ; Mohammed, 2009 ; Ademe, 2002 ; Bisson, 2002) :

1.3.3.1 Source naturelle ou biogénique

Les sources naturelles sont diverses entre autre :

- ✚ Le volcanisme qui est à la base de la présence des particules fines en grandes quantité
Les fines cendres volcaniques, émises directement à partir de ces sources ponctuelles, diffusées largement à des altitudes atmosphériques élevées, affectent habituellement les zones à proximité, mais aussi, des zones urbaines lointaines où on trouve des traces de ces fines cendres (Ferrara et al., 2000)
- ✚ Les feux de forêts qui ont un effet significatif sur la concentration des particules dans l'atmosphère (Meddour-Sahar et al., 2013).
- ✚ Formation d'embruns marins qui sont un mélange de sels inorganiques et de matières organiques ils peuvent contribuer à plus de 80% de la masse moyenne annuelle de PM10 (Putaud et al., 2004)

- ✚ Les aérosols biologiques sont partout dans l'atmosphère et sont formés des fragments d'organismes vivants ou morts, des débris végétaux, des cellules humaines et animales, des fragments d'insectes, des filaments de cheveux cassés, et ainsi de suite (Jaenicke et al., 2007)

1.3.3.2 Source anthropique

On appelle source des polluants particuliers atmosphériques anthropiques les émissions d'origine humaine, elle peut être directe ou indirecte tel que :

- L'industrie est un des secteurs majeurs
- Le transport, qu'il soit aérien, maritime ou terrestre, il émet des quantités considérables des PM dans les gaz d'échappement, ...
- Les combustions et les incinérations sont aussi à la base de l'émission des particules
- Le secteur agricole est aussi responsable des émissions de poussières.

La dangerosité de ces polluants a poussé l'union Européenne à mettre en place des directives et des normes pour contrôler et limiter les émissions polluantes des principales sources anthropiques et aussi permettre la surveillance des polluants réglementés avec des objectifs de qualité uniforme à l'échelle européenne (ADEME, 2002).

Les particules peuvent être aussi classé selon leurs mécanismes de formation dont on distingue les particules primaires et secondaires (AQEG, 2005 ; Stockwell et al., 2003).

Les particules primaires sont directement rejetées dans l'atmosphère sous forme solide ou liquide. Par exemple, les particules minérales produites par les érosions des sols, le sable d'origine désertique, les vagues océaniques ou embruns marins, les cendres volcaniques et tant d'autre. En milieu urbain, on peut trouver des fumées et poussières de chauffage, des particules directement émises par la combustion du carburant automobile ou des particules d'usure des pneus et des freins, ou encore des particules issues de la remise en suspension des sédiments sur les véhicules.

Les particules secondaires sont produites par la transformation des gaz présents dans l'atmosphère en particules. Cette conversion se fait de l'état gazeux à l'état solide soit par l'intermédiaire des gouttelettes, elle est appelée « nucléation » qui est un mécanisme de base de la formation des particules dans l'atmosphère. Les principaux éléments qui entrent dans la formation des particules secondaires sont :

- ✚ Le dioxyde de soufre (SO₂),

- ✚ Les oxydes d'azote (NO_x et nitrates),
- ✚ Les composés organiques volatils (COV)
- ✚ L'ammoniac (NH_3)
- ✚ Les radicaux hydroxyles (OH^\cdot) et d'autres molécules réactives.

Les particules secondaires sont essentiellement les particules fines qui sont regroupés en deux groupes les aérosols inorganiques secondaires (AIS) et les aérosols organiques secondaires (AOS) (Stockwell et al, 2003)

1.3.4 Durée de vie des particules et les processus d'élimination

Le taux des particules dans l'atmosphère diminue selon deux mécanismes :

- ✚ Le dépôt à la surface (dépôt sec)
- ✚ Le mélange des particules dans les gouttelettes des nuages au cours de la formation des précipitations (dépôt humide)

Ces deux mécanismes sec et humide réduisent le temps de séjour des particules dans la troposphère. La durée de vie des aérosols atmosphériques dépend de la taille, de la composition chimique et des caractéristiques thermodynamiques des particules. Si les traces de gaz atmosphériques ont des durées de vie allant de moins d'une seconde à un siècle ou plus, les temps de séjour des particules dans la troposphère ne varient que de quelques jours à quelques semaines (Mészáros, 1999).

Les particules inférieures à 20 nm formées par nucléation ont une durée de vie très courte (quelques heures), car elles se transforment plus vite en particules plus grosses allant de 0,01 à 0,1 μm . La durée de vie des particules inférieures à 50 nm diminue lorsque le diamètre augmente pouvant faire quelques heures pour les PM supérieures à 20 μm et 2 à 4 jours pour les particules de 2–3 μm de diamètre, alors que les particules dont la taille varie entre 0,1 et 1 μm présentent une durée de vie dans l'atmosphère, de quelques semaines tout au plus (Mészáros, 1999 ; Carlson et al., 1972).

Signalons que la composition chimique des particules affecte également leur durée de vie. La durée de vie est liée à leurs caractéristiques d'absorption d'humidité. Les particules grossières et celles qui sont produites par le processus d'accumulation ont des noyaux de condensation efficaces, parce qu'elles ont généralement une grande fraction de solubilité dans l'eau, et elles sont principalement éliminées de l'atmosphère par dépôt humide (Lozano, 2007).

1.3.5 Les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé humaine

Les effets des particules sur la santé sont dus à l'intensité de l'exposition ainsi qu'à la durée de vie ces particules. Ceci engendre des difficultés respiratoires, une aggravation des maladies respiratoires et cardiovasculaires chroniques, une diminution de la fonction pulmonaire et une mortalité prématurée (USEPA, 1999). En Algérie, on estime que chaque année, 10 à 12 millions d'habitants consultent pour des épisodes aigus de maladies respiratoires (Matet, 2002). Selon Laïd et al. (2006), 4,5% des consultations médicales annuelles à Alger, pour maladies respiratoires aiguës, sont directement liées à la pollution par les PM10. De nombreuses études suggèrent que les effets des particules sur la santé peuvent se manifester à des niveaux de pollution qui sont égaux ou inférieurs aux niveaux autorisés par les normes nationales et/ou internationales de la qualité de l'air. Les études toxicologiques suggèrent que plusieurs éléments, y compris l'aluminium, le silicium, le vanadium et le nickel sont étroitement associés aux effets néfastes sur la santé, bien que, de nombreux autres éléments ainsi que des composants contenant du carbone ont aussi été impliqués (Rohr et al., 2012).

L'impact de la pollution atmosphérique sur la mortalité de la population générale a été largement démontré. Cependant, des personnes appartenant à divers groupes de la population, peuvent être plus vulnérables aux effets des polluants. Ainsi, les études ont été menées pour caractériser ces groupes de personnes et pour estimer l'impact à court terme de la pollution de l'air à leur niveau. Les études ont montré que les enfants, les personnes âgées, les personnes souffrant d'une maladie chronique ainsi que les personnes défavorisées sur le plan socio-économique (Pascal, 2009). Les enfants sont considérés comme plus sensibles à la pollution atmosphérique car leur système immunitaire et leur croissance pulmonaire n'est pas encore terminée. De plus, ils passent généralement beaucoup de temps dehors que les adultes et sont donc plus exposés à cette pollution (Schwartz, 2000). Les personnes âgées sont considérées comme plus vulnérables vis-à-vis de la pollution atmosphérique en raison de la présence de poly pathologies plus fréquentes à cette période de la vie et d'une diminution de leurs défenses immunitaires (Kelly et al, 2003). Les personnes souffrant de pathologies aiguës ou chroniques ou encore de diabète ont suggère qu'ils sont également exposés aux risques de décès en lien avec la pollution de l'air (Sunyer et al, 2000) et pour les personnes défavorisées sur le plan socio-économique il est aussi suggéré que la majorité des populations pauvres ont tendance à vivre dans des zones plus fortement polluées. Des études ont donc récemment évalué l'influence du statut socioéconomique des populations soumises à des niveaux ambiants de pollution

atmosphérique sur la relation avec la santé et la mortalité aussi. La figure 1.3 montre la façon dont les particules pénètrent dans les poumons selon la taille.

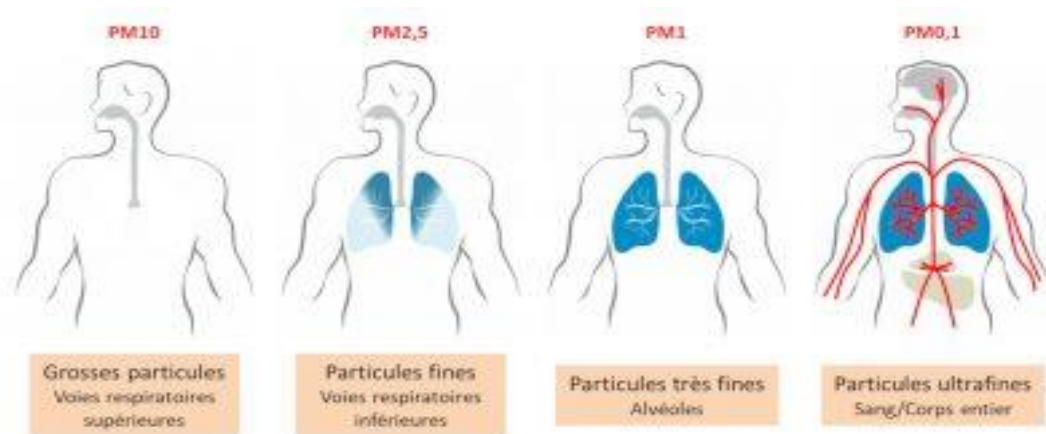


Figure 1.3 Pénétration pulmonaire des particules.

[Source : © Encyclopédie de l'Environnement]

En résumé les plus grosses particules sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines sont les plus dangereuses, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons, atteindre les alvéoles pulmonaires et transporter des composés toxiques. Les particules augmentent le risque d'infections respiratoires aiguës chez l'enfant et renforcent des sensibilités allergiques ou des pathologies préexistantes. De plus, certaines particules en suspension contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) aux propriétés mutagènes et cancérogènes (OUZID, 2017).

1.2.6 Normes sanitaires

Les normes sanitaires sont le résultat d'estimations et de modélisations. Elles ne sont pas les mêmes partout dans le monde, mais on peut citer les principales en ce qui nous concerne, celles de l'OMS et celles de l'Union Européenne. La figure 1.4 montre le seuil fixé par l'OMS et par l'Union Européenne.

	Normes Européennes (valeurs limites)	Valeurs guides OMS
PM2,5	<ul style="list-style-type: none"> Moyenne annuelle : 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 	<ul style="list-style-type: none"> Moyenne Annuelle : 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Moyenne par jour: 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	<ul style="list-style-type: none"> Moyenne annuelle : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Moyenne par jour : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an 	<ul style="list-style-type: none"> Moyenne annuelle : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Moyenne par jour : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figure 1.4 le seuil fixé par l'OMS et par l'Union Européenne.

On peut remarquer que les seuils de l'OMS sont beaucoup plus protecteurs que les normes Européennes.

Chapitre 2 : Milieu, matériel et méthode

La méthodologie est une étape très importante pour ce travail, le prélèvement des particules dans l'air s'est fait dans le village Misansa dans une zone à forte activité charbonnière et à quelque mètre ces activités.

2.1 Milieu

2.1.1 Localisation de la province du Haut-Katanga

La province du Haut-Katanga est située au Sud-Est de la République Démocratique du Congo (RDC), elle est localisée dans le carré constitué par les 10^{ème} et 13^{ème} parallèles et les 25^{ème} et 28^{ème} méridiens. Une caractéristique principale du climat de la région, reconnue par plusieurs auteurs, consiste dans la succession de deux saisons au cours de l'année. La saison de pluie et la saison sèche, la première s'étend, généralement, d'octobre-novembre à mars-avril ; la seconde, caractérisée par des précipitations très faibles, s'étend généralement de juillet-août à quatre mois sans pluie (Malaisse et al., 1978).

La province du Haut-Katanga se distingue par la présence de *l'arc cuprifère Katangais* localisé dans une dépression orientée Sud-Est et Nord-Ouest. Celui-ci s'étend de la 10^{ème} à la 12^{ème} parallèle Sud et du 25^{ème} au 33^{ème} méridien de longitude Est et est bordé par les massifs anciens de Kabombo, Solwezi, Kakota, Lwina et Mokambo au Nord ; et au Nord-Ouest par les massifs Kibariens, les plateaux de Kundelungu et Biano (Okitaudji, 2001).

Elle est depuis 2015 une province de la RDC issue du démembrement de l'ancienne province du Katanga. Elle comprend deux villes (Lubumbashi et Likasi) ainsi que six territoires (Kambove, Kasenga, Kipushi, Mitwaba et Pweto).

2.1.2 Présentation du milieu d'étude

L'étude a été menée dans la province du Haut Katanga, territoire de Kipushi, village Misansa. Ce dernier se trouve à 37,13Km au Nord-Est de la ville de Lubumbashi et à 7 Km à l'Ouest de la société minière MMG. La population du village Misansa vit principalement de l'agriculture en saison de pluie et de la production des charbons de bois en saison sèche. La figure 1.4 montre la localisation du village Misansa



Figure 2.1 Localisation du village

2.1.2 Climat

De très nombreux auteurs ont traité du climat du Haut-Katanga et ont pu conclure que le Haut-Katanga est presque entièrement couvert par un climat dit katanguien. Ce climat correspond à la zone d'influence de l'alizé austral qui va vers le Sud au sous-climat congolais-méridional du climat guineen-forestier. La saison sèche, longue de 4 à 6 mois et la saison des pluies de 6 à 7 mois il tombe en moyenne de 1.000 à 1.550 mm d'eau (Aubreville, 1949). Dans cette zone d'étude, la hauteur moyenne annuelle de précipitation est de 1200 mm avec les pluies allant d'Octobre à Mars (Micha et al. 2014). La température moyenne est comprise entre 17°C et 24 °C.

2.1.3 Végétation

La végétation de la province du Katanga est une forêt claire appelée « Miombo ». Le Miombo est un type de forêt claire constitué d'arbres à larges feuilles caduques et caractérisé par la prédominance des espèces du genre *Brachystegia*, *Julbernardia* et *Isoberlinia* (Chidumayo et al., 2010 ; Malaisse, 1987). On considère que le Miombo représente plus de 50 % des forêts claires de la région zambézienne. L'appellation vient du terme « *Miombo* » qui désigne les

arbres du genre *Brachystegia* dans plusieurs langues du plateau central d'Afrique australe (Smith and Allen, 2004).

Selon quelques auteurs, on distingue plusieurs variantes au sein de la forêt claire Zambézienne, à savoir (Malaisse, 1997 ; Campbell, 1996) :

- Le miombo à dominance de *Brachystegia*, *Julbernardia* et *Isoberlinia* ;
- La forêt claire Mopane à dominance de *Colophospermum mopane* ;
- La forêt claire à dominance de *Baikiaea plurijuga*, établie sur sables de type Kalahari ;
- La forêt claire à dominance de *Marquesia macroura*.

En termes de structure, la végétation de la forêt claire de type miombo est constituée de trois strates différentes, la strate arborescente (dominante), strate arbustive plus ou moins mal développée ainsi qu'une strate herbacée bien développée (Devred, 1958 ; Schmitz, 1971 ; Malaisse, 1979). Tout d'abord, la strate arborescente (dominante) a une hauteur moyenne de 15 à 20m, et une cime qui est souvent jointive, ayant un couvert végétal léger et le plus souvent étalé en parasol (Malaisse, 1979 ; Devred, 1958). L'accessibilité de la lumière permet ainsi l'installation d'une strate arbustive plus ou moins mal développée ainsi qu'une strate herbacée bien développée (Schmitz, 1971). Selon Helson (2013), la strate herbacée des forêts claires est principalement composée de graminées. La figure 1.5 montre les tapis graminées de la forêt claire.



Figure 2.2 Forêt claire de Miombo avec tapis graminées

2.1.4. Le sol

Selon Sys et Schmitz (1959), l'unité de base de la classification des sols autour de Lubumbashi est la série. Celle-ci représente un groupe de sols à horizons différenciés dont les caractéristiques pédologiques et les profils présentent de grandes affinités. Les différentes séries de sols que l'on retrouve localement appartiennent aux catégories des sols zonaux, intrazonaux et azonaux. Les sols zonaux rouges à jaunes appartiennent au groupe des sols ferralitiques, les sols rouges présentent d'excellentes conditions d'oxydation tandis que les sols jaunes présents là où la nappe phréatique est peu profonde connaissent des conditions moins favorables d'oxydation. Quant aux sols intrazonaux, ils se situent dans les vallées, les dépressions, les marais et certaines parties déprimées du paysage étant colmatées par des colluvions ou des alluvions récentes, d'origine colluvionnaire ou alluvionnaire, ils sont classés en sols à gley (profil jaune clair avec taches de rouille), sols gris hydromorphes (profil gris réduit sans horizon A0) et sols des marais (profils gris réduit avec accumulation importante de matières organiques en surface). Enfin, les sols azonaux ont pour matériaux originels des affleurements rocheux, des carapaces latéritiques en voie de démantèlement ou des substrats graveleux.

Il est important de signaler que durant plusieurs années, l'extraction des minerais a conduit à la pollution des sols et des eaux environnantes par la retombée de particules métallifères à l'ouest de la ville due aux vents dominants dans la région (Vranken, 2010 ; Boisson *et al.*, 2015). Cette situation n'a pas tardé de compromettre la qualité des légumes produits et commercialisés sur les marchés locaux (Carole, 2013 ; Mpundu *et al.*, 2013) mais aussi être à la base des lourdes conséquences sur la santé des populations humaines. En 2009, les concentrations importantes en cobalt, cadmium et cuivre étaient détectées dans les urines des populations, particulièrement chez les enfants de moins de 14 ans résidant à moins de 10 km des installations minières (Banza *et al.*, 2009).

2.2. Méthodologie

2.2.1. Prélèvement des données

2.2.1.1. Justification du site de prélèvement

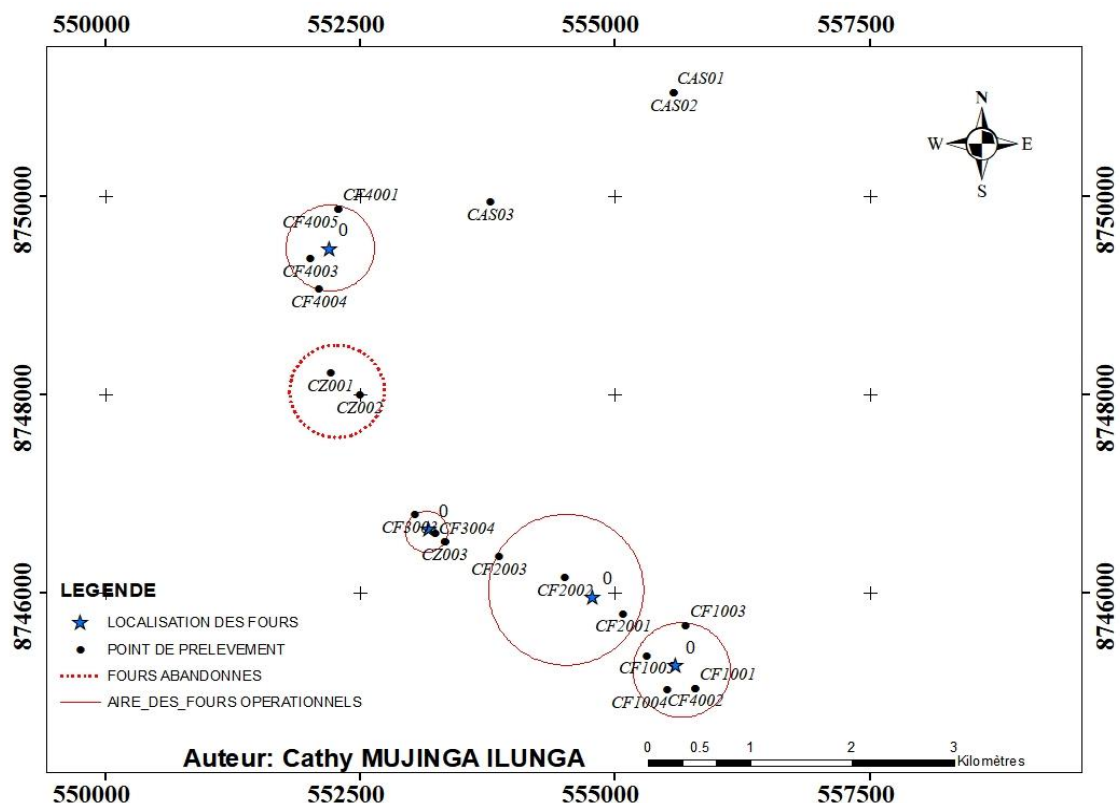
Les données utilisées dans cette étude ont été prélevées au village Minsansa, dans la région de Kinsevere. Une pré-investigation a été réalisée pour sonder la source de provenance des charbons des bois vendu dans la ville de Lubumbashi. Et on a dégagé de ces pré investigations qu'une grande quantité des charbons vendu dans la partie nord-est de Lubumbashi (précisément marché rail) provenait de ce milieu de production. Ainsi, le choix de ce milieu a été raisonné. Pour ce faire, trois types de sites ont été retenus comme échantillon pour l'atteinte pour la

réalisation de cette étude, ils ont été notamment, le site des fours actifs, sites des fours non actifs et site sans four comme témoin.

Les prélèvements ont été réalisés durant la période allant du mois d'Août au mois de Septembre de l'année 2021. Cette période a été choisie à cause de l'intense activité de production de charbon de bois comme révélé par les producteurs. Ainsi, elle semble la plus favorable en terme économique et condition pour les producteurs.

Ainsi deux types de particules ont été évaluées, notamment le PM_{2.5} et le PM₁₀. Le choix de ces particules a été conditionné par le type d'instrument (appareil) qui était disponible pour le prélèvement.

Les mesures des concentrations des PM ont été effectuées sur 30 points (colorés en noir dans **figure 2.4**), répartis en trois groupes de mesures (CF, CZ, CAS). Le premier groupe CF représente la zone où il y a des fours actifs et le prélèvement était fait à proximité immédiate des fours à 5 mètres et à 10 mètres. Le deuxième groupe CZ représente la zone des fours non actifs et le troisième groupe CAS représente la zone sans fours ou la zone qui est supposée être saine, celle-ci à une distance de 900 et 1000 mètres comme représenté dans la **figure 2.4**.



2.2.2. Méthode de prélèvement

Le choix raisonné a été réalisé pour retenir le milieu d'étude. La méthode de prélèvement choisie était aléatoirement simple, ce prélèvement a été fait de manière à avoir trois échantillons représentatifs. Les mesures des concentrations des PM ont été faites in situ à l'aide d'un capteur des particules à rayon laser du type Trotec bq 20 tenu dans la main à une hauteur comprise entre 1,65 et 2 mètres par rapport au sol. Cette démarche méthodologique a été initiée pour quantifier les particules, évaluer l'évaluation de leur teneur dans l'atmosphère et la cartographie de la dispersion des particules dans l'atmosphère.



2.2.3. Matériels utilisés

Cette étude a utilisé les matériels suivants :

2.2.2.1. Appareil de prélèvement des particules : TROTEC BQ20

Le Trotec BQ20 a permis de prélever les particules suspendues dans l'atmosphère.



2.2.2.2. Le GPS

Le GPS a été utilisé pour le prélèvement des coordonnées tridimensionnelles. Il a permis aussi de mesurer la zone de prélèvement.



2.2.2.3. Le Décamètre

Le décamètre a été utilisé en compagnie du GPS pour mesurer les sites de prélèvement des données.



2.2.2.4. Fiche de prélèvement

La fiche de prélèvement (ANNEXES) a été utilisée pour écrire les valeurs prélevées par Trotec.

2.2.4. Traitement statistiques des données

Les données prélevées ont été encodés et normalisées grâce au tableur Excel. Les traitements statistiques ont été réalisés grâce au Logiciel R. celui-ci a permis de comparer grâce à l'analyse de la variance les données des différents sites ciblés. Il a aussi permis de réaliser les analyses descriptives sur l'évolution journalières des particules. Les Logiciels ARC GIS et QGIS ont permis de cartographier la dispersion spatiale des particules dans l'atmosphère.

2.2.5. Philosophie de l'étude

L'approche analytique et comparative ont guidé cette étude. L'approche analytique a été initiée pour évaluer l'évolution journalière de la quantité des particules et leur dispersion dans l'atmosphère, tandis que l'approche comparative a été utilisée pour comparer la teneur de ces dernières dans l'atmosphère.

2.2.6. Présentation des variables analysées

Les variables étudiées dans cette ont été les particules PM_{2.5} et PM₁₀ la concentration (teneur), type de four de prélèvement, l'évolution journalières de la concentration et la dispersion spatiale des particules.

Chapitre 3. Résultats

3.1. Comparaison des concentrations des différentes particules en fonction de différents sites étudiés

3.1.1. PM2.5

Les résultats relatifs à la concentration en PM2.5 dans les sites étudiés sont présentés dans la figure 3.1. Il ressort de l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur des différences très hautement significatives entre les moyennes de concentrations ($p = 0.0004275$) des différents fours. Ainsi, la comparaison des moyennes par le test de Tukey (HSD) montre que le site des fours actifs a présenté une concentration moyenne très élevée ($200.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM2.5, pendant que les sites des fours non actifs et sans four ont donné des concentrations faibles et similaires (21.95 et $21.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En outre, tous les trois sites ont donné des concentrations supérieures aux seuils indiqués par l'OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ; avec spécifiquement des concentrations 20 fois supérieures au seuil de l'OMS pour les sites des fours actifs.

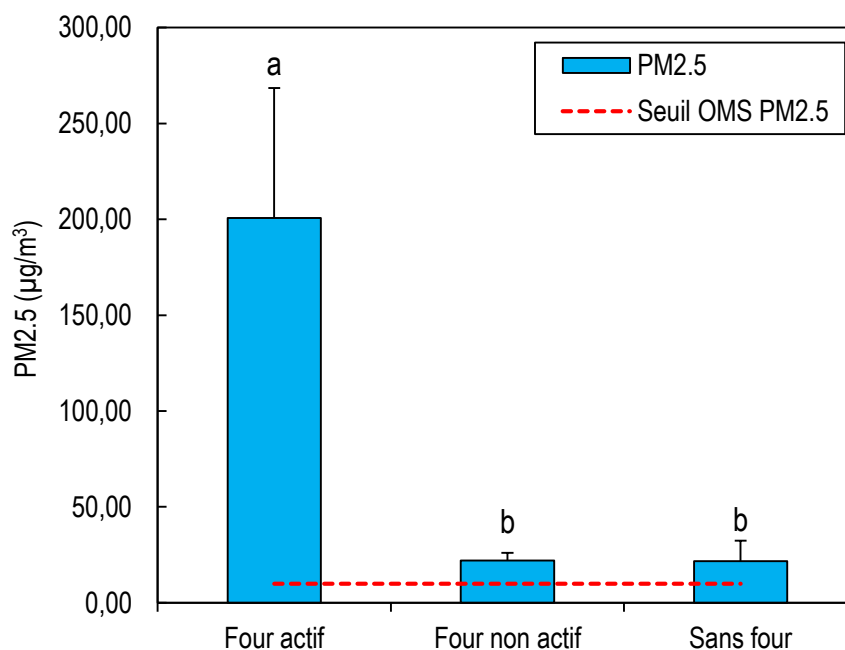


Figure 3.1. Concentration en PM2.5 dans les différents sites étudiés ($p = 0.0004275$).

3.1.2. PM10

La **figure 3.2** présente les résultats relatifs à la concentration en PM10 dans les sites étudiés. Il ressort de l'analyse de la variance (ANOVA) des différences très hautement significatives entre les moyennes de concentrations des différents sites de prélèvement en PM10 ($p = 0.0009733$). De ce fait, la comparaison des moyennes par le test de Tukey (HSD) montre que le site des

fours actifs a présenté une concentration moyenne en PM10 très élevée ($388.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pendant que le site de fours non actifs et celui sans four ont donnée des concentrations faibles et similaires (44.15 et $39.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Par ailleurs, tous les trois sites ont donné des concentrations supérieures aux seuil indiqué par l'OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ; les concentrations enregistrées dans le site aux fours actifs sont 19 fois supérieures au seuil de l'OMS.

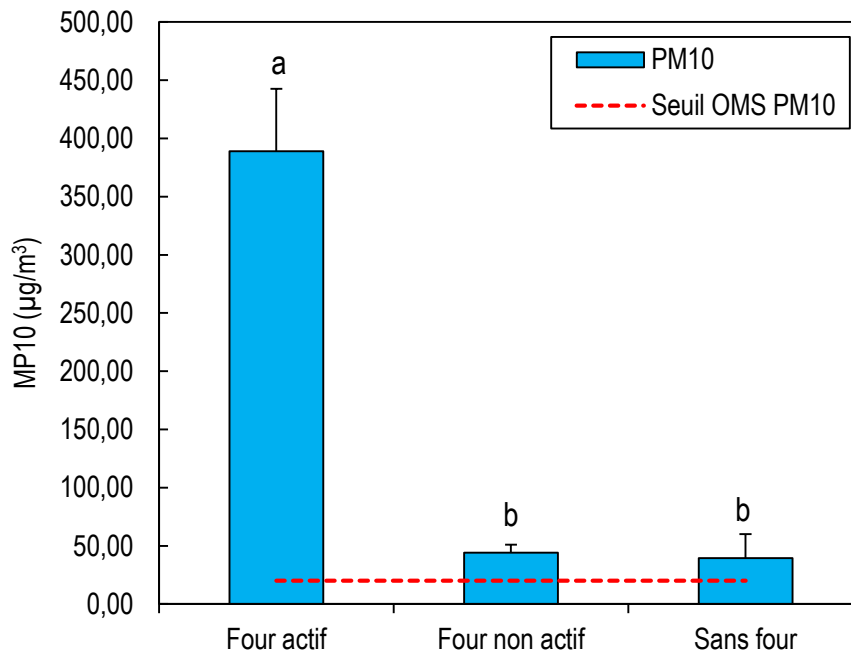


Figure 3.2. Concentration en PM10 dans les différents sites étudiés ($p = 0.0009733$).

3.2. Evolution journalière de la concentration particules dans différents sites étudiés

3.2.1 Four actif

Les figure 3.3 et 3.4 présentent respectivement les résultats liés à l'évolution journalière des concentrations en PM2.5 et PM10 dans le site aux fours actifs en comparaison au seuil de l'OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10). L'observation des courbes montre que ça soit pour les concentrations en PM2.5 ou en PM10, on constate une évolution fluctuante de la courbe à l'opposé de celle de l'OMS qui est linéaire au courant de la journée. Par ailleurs on observe des fortes concentrations vers 10 heures et 16heures, pendant que les faibles concentrations ont été observés vers 8 heures et 12 heures. En outre, malgré la fluctuation des concentrations en PM2.5 et PM10 au courant de la journée, les valeurs de concentration restent de loin supérieures au seuil de l'OMS au regard des courbes.

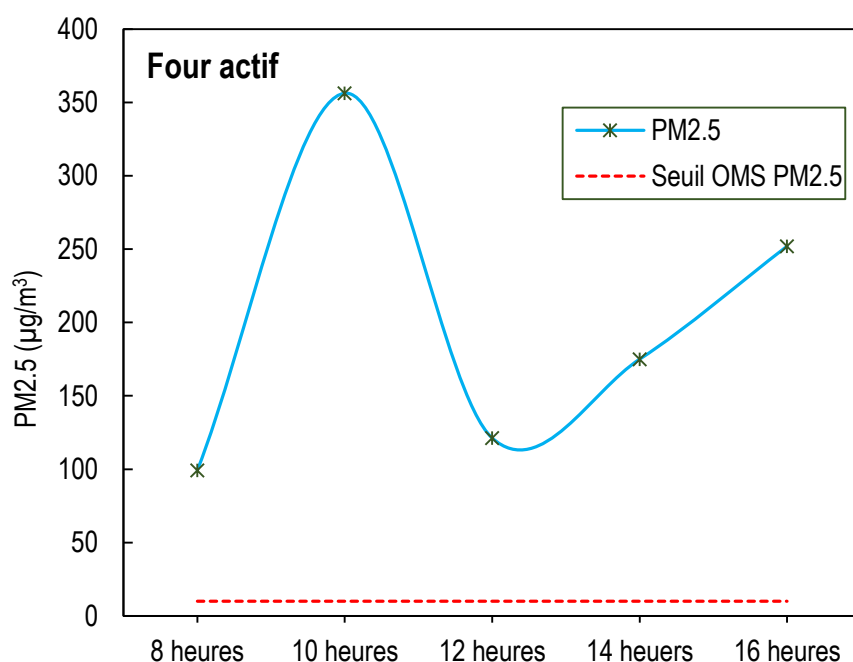


Figure 3.3 Evolution journalière de la concentration en PM2.5 sur le four actif.

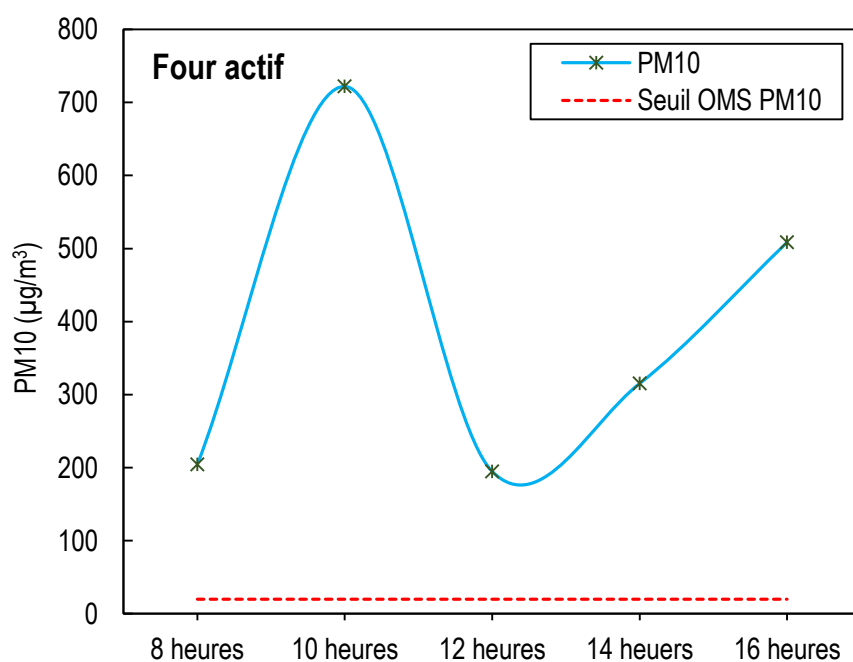


Figure 3.4 Evolution journalière de la concentration en PM10 sur le four actif.

3.2.2. Fours non actifs

Les figure 3.5 et 3.6 présentent respectivement les résultats liés à l'évolution journalière des concentrations en PM2.5 et PM10 dans le site aux fours non actifs en comparaison au seuil de l'OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10). L'observation des courbes montre que ça soit pour les concentrations en PM2.5 ou en PM10, les fortes valeurs ont été observées vers

14 heures d'après-midi ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et $48.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10), pendant que les faibles valeurs ont été observés vers 8 heures ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et $39.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10) et 16 heures ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et $43.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10). La tendance montre une augmentation des concentrations entre 8 et 14 heures et une sensible baisse vers 16 heures. En outre, malgré la fluctuation des concentrations en PM2.5 et PM10 au courant de la journée, les valeurs de concentration restent de loin supérieures au seuil de l'OMS.

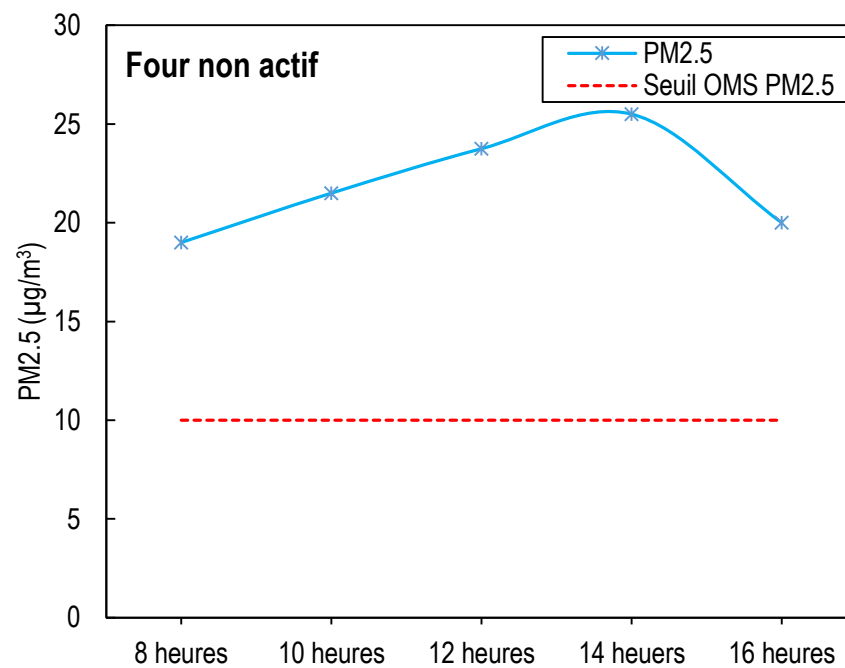


Figure 3.5 Evolution journalière de la concentration en PM2.5 sur le four non actif.

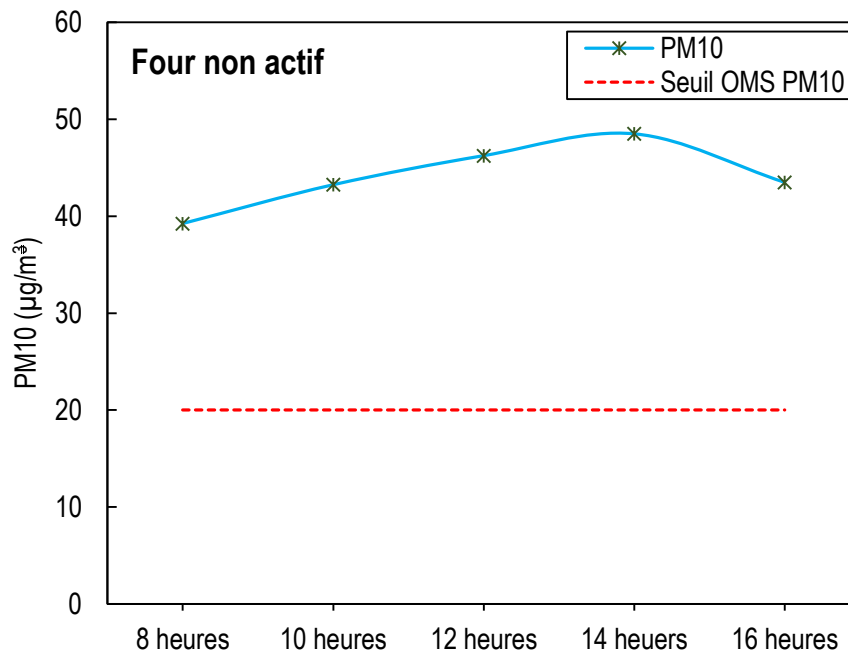


Figure 3.6 Evolution journalière de la concentration en PM10 sur le four non actif.

3.1.3. Site sans four

Les **figure 3.7** et 3.8 présentent respectivement les résultats liés à l'évolution journalière des concentrations en PM2.5 et PM10 dans le site sans four en comparaison au seuil de l'OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10). L'observation des courbes montre que ça soit pour les concentrations en PM2.5 ou en PM10, les fortes valeurs ont été observées vers 16 heures (27.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et 48.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10), pendant que les faibles valeurs ont été observés à 14 heures (18.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et 35.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM10). La tendance montre une augmentation des concentrations entre 14 et 16 heures. En outre, malgré la fluctuation des concentrations en PM2.5 et PM10 au courant de la journée, les valeurs de concentration restent de loin supérieures au seuil de l'OMS.

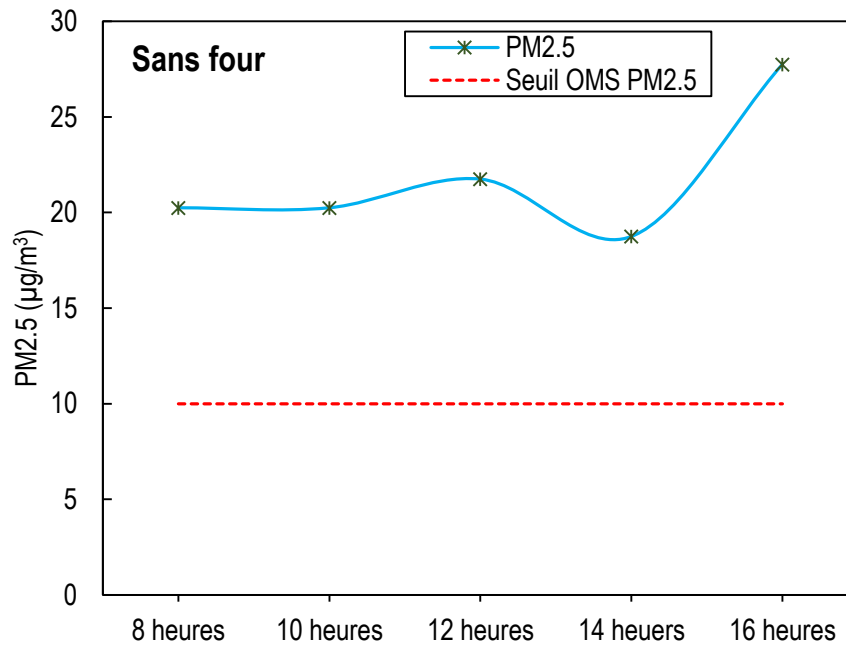


Figure 3.7 Evolution journalière de la concentration en PM2.5 sur le site sans four.

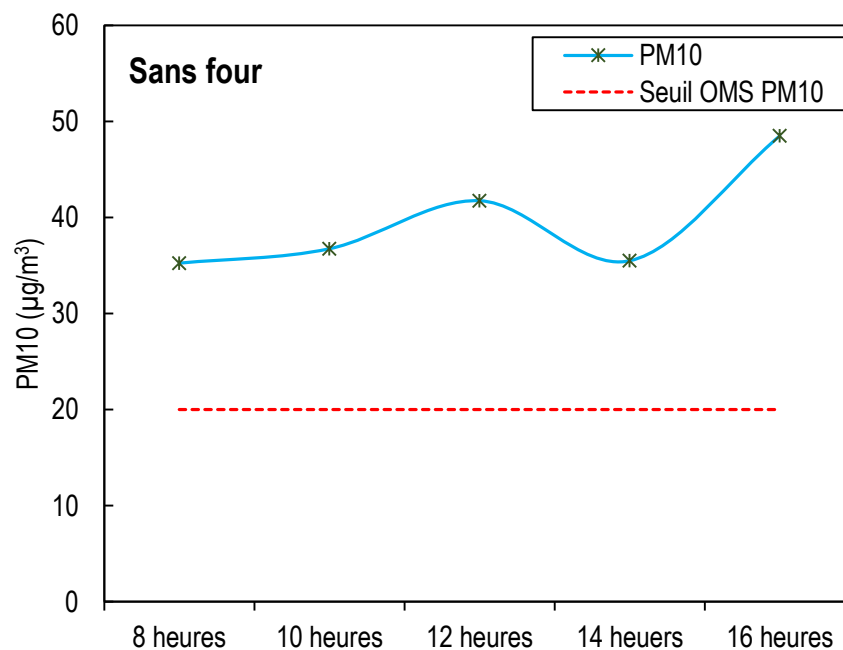


Figure 3.8 Evolution journalière de la concentration en PM10 sur le site sans four.

3.3. Distribution spatiale de la concentration en particules dans les sites étudiés

Les *figures 3.9 et 3.10* présentent respectivement la distribution spatiale (interpolation) des concentrations en PM2.5 et en PM10 dans la zone d'étude. L'observation des cartes de distribution spatiale montre que les fortes concentrations en PM2.5 et PM10 (respectivement supérieures à 272 µg/m³ pour PM2.5 et 535 µg/m³ pour PM10) ont été obérées au Sud de la

zone (couvert par les fours actifs), les valeurs intermédiaires ont été observé au centre de la zone (couvert par les fous non actifs), pendant que des faibles concentrations (inférieures à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PM2.5 et 37 pour PM10) ont été observées au Nord de la zone (une zone sans four).

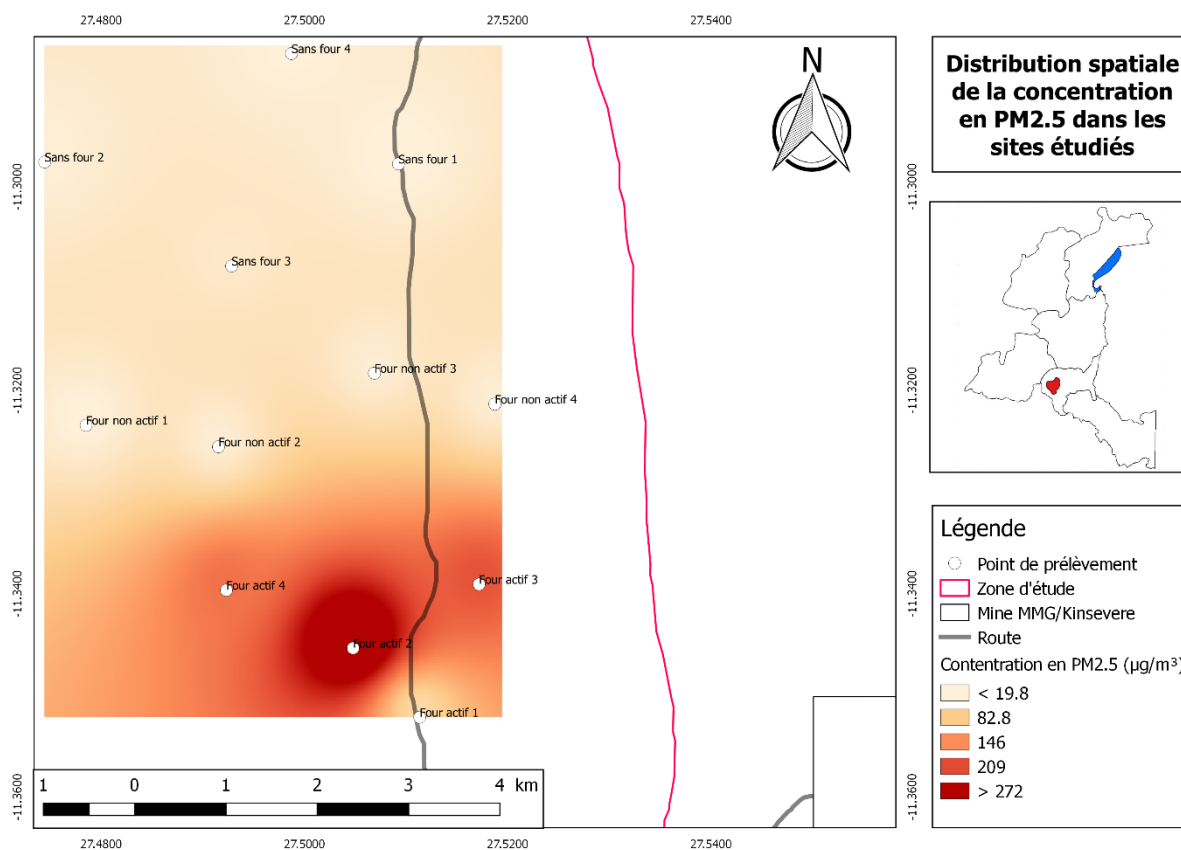


Figure 3.9 Distribution spatiale de la concentration en PM2.5 dans les sites étudiés.

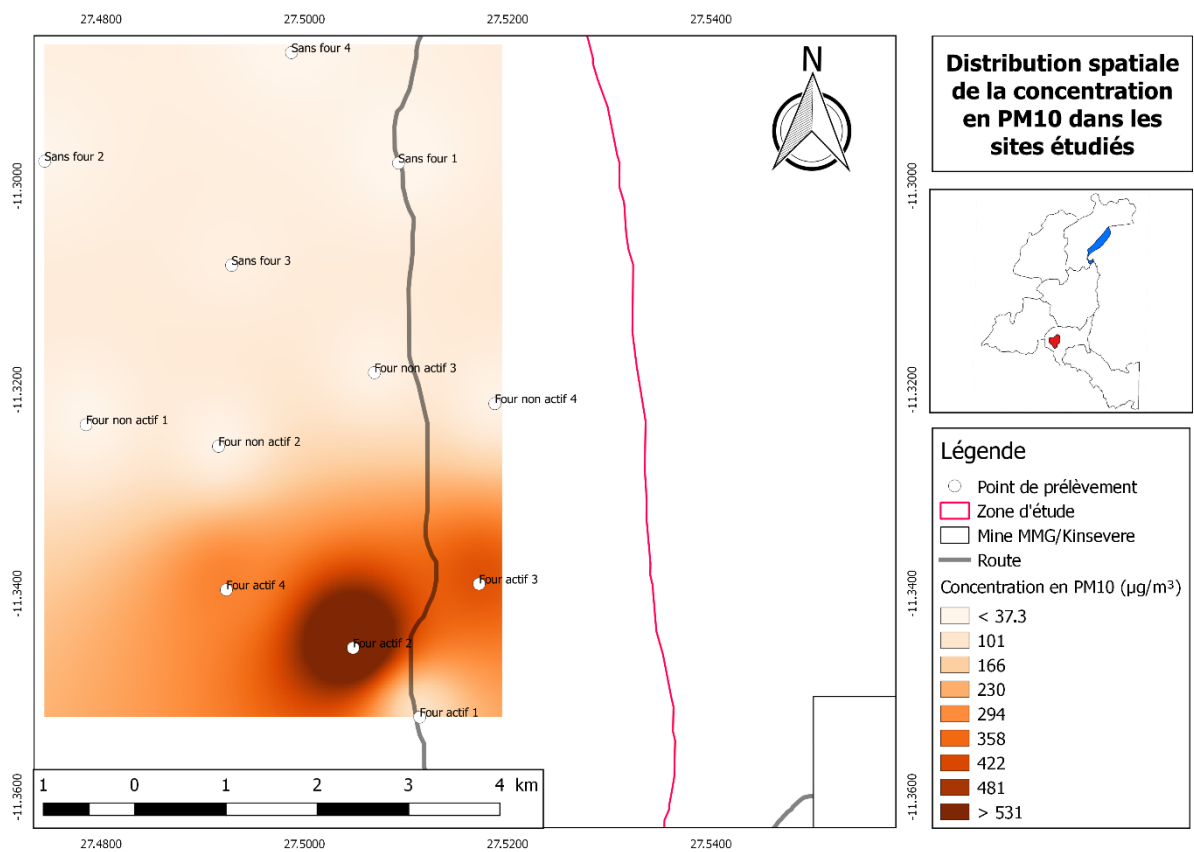


Figure 3.10. Distribution spatiale de la concentration en PM10 dans les sites étudiés.

CHAPITRE 4 DISCUSSION

L'activité de charbonnage constitue une source potentielle de pollution atmosphérique par l'émission des particules. Le rapport synthétique des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'AIRPARIF sur ces polluants, effectué en 2008 révèle que cette activité a été à l'origine des particules PM_{2.5} et PM_{2.10} vers les années 50 sur l'Île de France. Ce rapport attribue cette forme de pollution à l'activité de combustion. Selon le même rapport, les villes chinoises enregistrent également des concentrations élevées en particules, dues aux particules primaires émises par la combustion du charbon et de la biomasse ainsi qu'aux pots d'échappement. En ce qui concerne cette étude, il ressort des concentrations nettement élevées en PM_{2.5} et PM₁₀ aux alentours des fours actifs, révélant ainsi des différences hautement significatives par l'ANOVA entre les moyennes de concentrations ($p = 0.0004275$) des zones de fours actifs, des fours sans actifs et des zones sans four. Ce qui signifie, que l'activité de charbonnage a réellement eu un impact remarquable dans la zone d'étude. En comparaison avec le seuil normal proposé par l'OMS, il se dégage clairement une pollution de l'atmosphère en particules car les moyennes de concentrations en particules prélevées sont nettement supérieures pour l'ensemble des zones de prélèvement, soit respectivement 200.75, 21.95 et 21.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{2.5} pour les four actifs, fours inactifs et zone sans four, et 388.95, 44.15 et 39.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM₁₀ respectivement pour les four actifs, fours inactifs et zone sans fours. En effet, ces teneurs à proximité des fours en activité sont nettement supérieures à 80,42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM₁₀ trouvées par Terrouche (2016) sur une source d'émission provoquée par l'activité anthropique en Algérie. Il révèle par ici, que ce seuil est nettement supérieure à la limite annuelle de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en vigueur dans l'Union Européenne et à la valeur guide de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ édictée par l'OMS. Une étude réalisée dans 239 villes américaines a montré un ratio PM_{2.5}/PM₁₀ compris entre 44 et 71 %, alors qu'il se situe autour de 50% au Caire (OMS, 2006). Le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ varie de 40 à 80% à travers l'Europe, selon la région et la typologie du site de mesure (Querol *et al.*, 2004). Terrouche (2016) justifie qu'il est d'autant plus important que les particules ont une origine anthropique, notamment en lien avec la production de particules fines liée à la combustion. Parlant de l'activité anthropique, dans le contexte locale le charbon constitue une principale source d'énergie et par conséquence constitue une source de revenu comme l'affirme Binzangi et al, 1994 que le charbon de bois est la principale source d'énergie dans les pays en voie de développement et sa consommation continue de croître sur le continent africain. Selon IEA (2006) une forte dépendance au charbon de bois s'observe en Afrique sub-saharienne où 93% de la population rurale et 58% de la

population urbaine dépendent de la biomasse comme combustible. En RDC, comme au Katanga le bois énergie continue de représenter la plus grande partie de l'exploitation forestière en Afrique (selon les estimations, la production du bois énergie se situe à 589 millions de m³ en 2006), soit 90% de la production totale des produits du bois en RDC (FAO, 2007 ; 2009). Cette situation accentue ainsi sa production et par conséquent les émissions de particules autour de la zone de production.

En ce qui concerne la cartographie de la dispersion spatiale des particules dans l'atmosphère, il découle que malgré qu'il y a des teneurs anormales des particules en suspension, la zone des fours actifs présente des teneurs nettement élevée par rapport aux zones des fours inactifs et sans fours. On constate que plus on s'approche des fours en activité, plus la teneur en particules augmente. Cet aspect semble être justifiée par l'intensité des activités de production de charbon qui constituent incontestablement une source d'émission. Pour ces faits Mpoyo et al., (2021) ont révélé dans une étude réalisée dans la ville de Lubumbashi le long d'une route à fort trafic que le rapprochement à la source d'émission influence aussi l'augmentation de la concentration des particules en suspension. Il est révélé dans une étude similaire sur les émissions provoquées par le trafic routier que, les points situés à proximité immédiate de la route ont enregistré des valeurs élevées comparativement aux autres stations et aux autres points éloignés de l'axe routier (Naser et al., 2008). Réalité observée par Choel et Visez, 2019, qui ont constaté que les points situés à proximité immédiate de l'axe routier qui était la source d'émission observée a enregistré des fortes concentrations en comparaison des points éloignés. Ainsi le rapprochement aux sources d'émission agit clairement sur la concentration des particules en suspension.

En ce qui concerne l'évolution journalière de la concentration particules dans différentes zones, il ressort du constat que les concentrations de PM_{2.5} et celles de PM₁₀ évoluent de façon fluctuante dans l'ensemble des zones de prélèvement. Cependant les résultats révèlent des faibles concentrations vers 8 heures et 12 heures pendant qu'une augmentation des concentrations est constatée vers 10 heures et 16 heures avec des pics qui avoisinent pour les fours actifs avec des piques qui oscillent autour de 700 µg/m³ en PM₁₀ et 350 µg/m³ en PM_{2.5}. Ces concentrations maximales avoisinent celles trouvées par SALAO et al. (2017) à Dakar où les concentrations maximales horaires ont été supérieures à 800 µg/m³ en PM₁₀ et 200 µg/m³ en P_{2.5} ont été trouvées. En ce qui concerne le temps où le pique est atteint, cette situation semble être corolaire à la variation des conditions météorologiques comme l'affirme Terrouche (2016) qui a constaté par exemple que lorsque la fréquence des vents calmes est plus élevée (36,1%), la concentration moyenne de PM_{2,5} > 20 µg/m³. Lorsque cette fréquence baisse

(30,6%), la concentration moyenne de $PM_{2,5} < 20 \mu g/m^3$. Il justifie ce constat par le fait que les conditions calmes provoquent une stagnation de la pollution au point d'émission. A ce propos une étude menée par un auteur Anonyme en 2005 a révélé que la région de Lubumbashi les alizés qui soufflent ont tendance à s'accroître autour des heures où on a observé des pics dans cette étude. Par ailleurs, il ressort que ces fluctuations sont régulières pour les fours inactifs, avec le pic atteint à 14 heures. En ce qui concerne la zone sans four, il se dégage que cette fluctuation est assez linéaire avec le pic remarqué vers 16 heures. En comparant ces dernières situations avec les premières, il se dégage que malgré qu'il y a pollution au courant des journées autour des zones sans fours et celles avec fours inactifs, les fluctuations de ces concentrations polluantes restent tout de même inférieures à celles des zones des fours actifs. Cette situation semble être justifiée par le fait que la période de pleine activité favorise considérablement l'augmentation des polluants dans l'atmosphère, dans la mesure où les fours de charbons sont les sources de cette dispersion. Selon plusieurs auteurs sus cités, en l'occurrence de Mpoyo et al., (2021), Naser et al., (2008) et Choel et Visez en 2019 ; plus on se rapproche d'une source d'émission en activité plus la concentration des émissions aussi augmente. D'une façon générale, il se dégage du constat, que les courbes évolutives journalières sont restées inférieures à celles du seuil normal proposé par l'OMS (2005). La moyenne de concentration de ce seuil reste largement supérieure à ce référentiel, selon lequel, il faut $10 \mu g/m^3$ et $20 \mu g/m^3$ comme seuil de $PM_{2.5}$ et PM_{10} admis.

CONCLUSION

Le charbon de bois est la principale source d'énergie dans les pays en voie de développement et sa consommation continue de croître sur le continent africain. Dans le monde, plus de 2,5 milliards de personnes dépendent des combustibles tirés de la biomasse pour satisfaire leurs besoins en énergie. Cette forte dépendance à l'égard du charbon de bois s'observe en Afrique sub-saharienne où 93% de la population rurale et 58% de la population urbaine dépendent de la biomasse comme combustible. Cependant, malgré cette importance, l'activité de charbonnage est au centre de plusieurs problèmes environnementaux, entre autre le réchauffement climatique par la déforestation, la dégradation des écosystèmes ou encore la pollution atmosphérique particulaire, qu'a traité cette étude.

C'est ainsi cette étude a été initiée pour évaluer l'impact des activités des fours de charbon de bois sur la pollution atmosphérique particulaire au Village Misansa dans la région de Kinsevere (Lubumbashi-Haut-Katanga). Cette évaluation est passée par la quantification des particules PM2.5 et PM10 dans l'atmosphère au sein différents zones de prélèvement sites d'étude ; la détermination de l'évolution journalière de la concentration en PM2.5 et PM10 dans l'atmosphère au sein de ces zones ; et fin la cartographie de la distribution spatiale des concentrations en PM2.5 et PM10 dans l'atmosphère dans le milieu étudié.

Pour atteindre les résultats, les prélèvements des particules ont été réalisées à l'aide d'un capteur laser de type Trotec bq20, au sein des trois types de sites, notamment, les sites des fours actifs, les sites des non actifs et un témoin des sites sans fours. Les données collectées ont été saisies grâce au tableur et traitées grâce aux logiciels R.

A l'issue de cette étude, l'ANOVA a révélé des hautes différences entre les zones de fours actifs et les autres zones, notamment les zones de sans four et zones avec fours inactifs, justifiant ainsi une remarquable influence du charbonnage sur la pollution de l'air. Cette pollution se justifie par les concentrations anormales des particules qui se sont révélées largement supérieures à celles du seuil normal de l'OMS pour les différentes particules. Le test de Turkey a révélé que les zones des fours actifs ont présenté des moyennes des concentrations nettement élevées par rapport aux zones sans four et à fours inactifs. Certains moments de la journée semblent favoriser la dispersion des particules par rapport à d'autres, ce qui induit à une évolution fluctuante de la courbe d'évolution journalière, s'opposant à la courbe d'évolution journalière de l'OMS où cette évolution est linéaire. La cartographie des particules a révélé que plus on s'approche des fours en activité, plus les concentrations en particules aussi augmentent, ce qui

confirme ainsi l'idée selon laquelle la combustion de charbons de bois influence positivement la pollution de l'atmosphère par les particules.

Au regard de ce qui précède, on peut donc conclure que la combustion de charbon de bois impacte négativement la qualité de l'environnement par l'émission des particules PM2.5 et PM10, qui sont dangereux pour la santé. En considérant la place de cette source d'énergie dans le quotidien local, au vu des multiples réalités, sa production doit suivre une approche intégrée prenant en compte les processus de production qui garantissent un respect des normes environnementales. La prise en compte de ces enjeux environnementaux permettront ainsi une gestion durable des ressources et une protection de l'écosystème et par conséquent une préservation de la vie.

BIBLIOGRAPHIE

1. AIRPARIF, 2008. Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'AIRPARIF sur ces polluants. Rapport d'activité Surveillance de la Qualité de l'Air en Ile-de-France. 105p
2. Banza, C., Nawrot, T., Haufried, V., Decree S., De Putter, T., Smolders, E., Kabyla, B., Luboya, O., Ilunga, A., Mutombo, A., Nemery, B. (2009). High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo, *Environmental Research*, 109,745-752.
3. Boisson S., Collignon J, Langunu S, Lebrun J, ShutCha M, Mahy G. (2015). Concilier la phytostabilisation des sols pollués avec la conservation de la flore cupro-cobalticole dans la région de Lubumbashi : une stratégie pour valoriser les écosystèmes extrêmes ? In J. Bogaert et J.-M. Halleux (Eds.), *Territoires périurbains, Développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud* Jan (p. 304).
4. Carole, 2013. Les maraîchers urbains de Lubumbashi : artisans de paix, Commission Justice et Paix Belge Francophone
5. Choel M, Visez N. Altération du grain de pollen par la pollution atmosphérique. *Rev Fr Allergol*. oct 2019;1,2,4.
6. Mohamed Naser T, Yoshimura Y, Sekiguchi K, Qingyue W, Sakamoto K. Chemical Composition of PM_{2.5} and PM₁₀ and Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons at a Roadside and an Urban Background Area in Saitama, Japan. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2008;2-2:90-101.
7. Mpoyo K. P., 2021. Contribution à l'étude de la pollution particulaire de l'air en milieu urbain : « Cas des PM_{2,5} et PM₁₀ le long de la route Kasapa, dans la Ville de Lubumbashi, en R.D. Congo ». *South Florida Journal of Development*, Miami, v.2, n.3, p. 4130-4141
8. Mpundu, M. M. M., Useni Sikuzani, Y., Ntumba Ndaye, F., Muyambo Musaya, E., Kapalanga Kamina, P., Mwansa, M., Nyembo Kimuni, L. (2013). Évaluation des teneurs en éléments traces métalliques dans les légumes feuilles vendus dans les différents marchés de la zone minière de Lubumbashi. *JABS*, 66, 5106-5113.
9. OMS. (2006). *Air Quality Guidelines - Global Update 2005 - Particulate Matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide*.

10. Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C. R., Artinano, B., Hansson, H., Harrison, R., Schneider, J. (2004). Speciation and origin of PM10 and PM2,5 in selected European cities. *Atmospheric Environment* (38), 6547–6555.
11. SALAO A., B., DIOP C., LIVARDJANI F. et DJOKHANE A., M., 2017. Évaluation des risques de la pollution atmosphérique (CO, NOX, SO2, O3, PM10 et PM2,5) de la ville de Dakar-Sénégal. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 30 (2017) 87- 101 ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>
12. Sys, C. et Schmitz, A. (1959). Notice explicative de la carte des sols et de la végétation. Région d'Elisabethville (Haut-Katanga). Bruxelles, Publ. INEAC. 70p.
13. TERROUCHE A., 2016. *Caractérisation de la pollution de l'air par les particules et les éléments métalliques dans la ville de Constantine. Thèse de Doctorat, Université des FRERES MENTOURI-CONSTANTINE* 1. 110p.
14. Vranken, I. (2010). Pollution et contamination des sols aux métaux lourds dues à l'industrie métallurgique à Lubumbashi : Empreinte écologique, impact paysager, pistes de gestion, 118p.