

Risques environnementaux et développement

Le cas de la pollution de l'air à Antananarivo, Madagascar

Mémoire réalisé par
Matthias Gorremans

Promoteur
Bruno Masquelier

Lecteur
Emmanuelle Piccoli

Année académique 2018-2019
**Master 120 en Sciences de la population et du
développement**

1. Table des matières

Remerciements	v
Lexique	vi
1. Introduction.....	1
2. Revue de la littérature.....	5
Emissions de pollution atmosphérique	5
Causes de mortalité liées à la pollution de l'air	6
Autres études portant sur la pollution de l'air à Antananarivo	8
Question de recherche	9
3. Situation du développement et de l'environnement à Antananarivo.....	12
Présentation de la ville d'Antananarivo	12
Actions gouvernementales.....	15
Engagements internationaux.....	15
Mesures locales de la pollution de l'air	17
4. Présentation des données.....	19
Données de pollution de l'air	19
La collecte des données	19
Exploitation des données.....	21
Données de mortalité.....	25
5. Résultats.....	27
Proportion de décès dus aux causes identifiées	27
Age moyen au décès dus aux causes identifiées	30
Tableau récapitulatif	32
Analyse des résultats au regard de l'étude de Cohen et al. (2017)	33
6. Limites de l'étude	36
7. Pistes d'avancées possibles.....	38
Diminution de la pollution.....	38
Monitoring.....	38
Accès libre des données dans le domaine public.....	38
8. Conclusion	40
9. Bibliographie.....	42

Articles et livres	42
Rapports et textes de loi	44
10. Packages R utilisés dans le cadre de ce mémoire.....	46
11. Annexes.....	48
Annexe 1.....	48
Annexe 2.....	49

« Je déclare sur l'honneur que ce mémoire a été écrit de ma plume, sans avoir sollicité d'aide extérieure illicite, qu'il n'est pas la reprise d'un travail présenté dans une autre institution pour évaluation, et qu'il n'a jamais été publié, en tout ou en partie. Toutes les informations (idées, phrases, graphes, cartes, tableaux,...) empruntées ou faisant référence à des sources primaires ou secondaires sont référencées adéquatement selon la méthode universitaire en vigueur. Je déclare avoir pris connaissance et adhérer au Code de déontologie pour les étudiant(e)s en matière d'emprunts, de citations et d'exploitation de sources diverses et savoir que le plagiat constitue une faute grave. »

Remerciements

Tout d'abord j'aimerais remercier mon promoteur Bruno Masquelier pour la disponibilité dont il a fait part, pour les rendez-vous et les relectures ainsi que pour les bons conseils prodigués.

Ensuite j'aimerais remercier tous les professeurs de l'UCL, qui ont dispensés des cours lors du master en science de la population et développement que j'ai eu lors de mes deux années. De plus j'aimerais remercier Emmanuelle Piccoli qui reliera ce texte en vue de sa défense.

D'un point de vue plus personnel j'aimerais remercier mes parents pour leur soutien durant toutes mes études et Cécile Jadot pour les nombreuses heures passées à travailler ensemble et pour son soutien au quotidien. J'aimerais aussi remercier mes co-koteurs et tout particulièrement Hubert de Condée et Elisa Vaylsteke, pour les moments passés ensemble lors du début de la rédaction. Merci aux autres étudiants de la promo SPED 2017-2018 qui m'ont bien aidé pour la rédaction de travaux lors du master et desquels j'ai beaucoup appris.

Finalement j'aimerais remercier Françoise Maire-Gorremans et Béatrice Dehem-Verbrügghen pour les relectures.

Lexique

ESCAPE	European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (Étude européenne de cohortes sur les effets de la pollution de l'air)
Fokonatany	La plus petite forme de zone administrative à Madagascar, ils seront appelés quartiers dans cette étude
GBD	Global Burden of disease
ICD	International Classification of Diseases
INSTAT	l'Institut National de la Statistique (de Madagascar)
IdO	Internet des Objets
ODD	Objectif de développement durable
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONU	Organisation des nations unies
PM _{2.5}	Airborne Particulate Matter, particules fines avec un diamètre inférieur à 2,5µm
UNECE	Commission économique pour l'Europe des Nations Unies
UNEP	United Nations Environment Programme

1. Introduction

La lutte contre la pollution atmosphérique ambiante figure dans nombre de programmes internationaux et fait partie des grands enjeux de santé actuels (World Health Organization, 2014). Elle figure en bonne place parmi les 17 objectifs de développement durable (ODD) définis par l'ONU à l'horizon 2030, qui constituent des boussoles pour les questions de développement. Le troisième objectif du développement durable (ODD 3) vise la bonne santé et le bien-être. Il se propose de « *permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge* », il cible l'accès général aux soins de santé. Dans son objectif spécifique 3.9, lequel indique qu'il faudrait : « *D'ici à 2030, réduire nettement le nombre de décès et de maladies dus à des substances chimiques dangereuses et à la pollution et à la contamination de l'air, de l'eau et du sol* », il cible plus précisément les décès liées à la pollution. Des indicateurs ont aussi été spécifiés pour les différents objectifs lors de la 46^e session de la Commission de statistique du Conseil Economique et Social des Nations Unies (mars 2016). Les indicateurs des ODD fournissent une base de travail qui permet de comparer et de suivre l'avancée des différents pays vers les objectifs fixés¹. En matière de pollution de l'air, l'indicateur 3.9.1 permet d'établir le taux de mortalité attribué à la pollution de l'air domestique et ambiant. D'après les dernières estimations, cet indicateur est de 39,24 (pour 100 000 habitants) à Madagascar en 2012 à l'échelle nationale. En comparaison, cette valeur est de 14,20 pour la Belgique.

Le second objectif de développement durable défini par l'ONU qui est présente un intérêt pour ce mémoire est l'ODD 3.4. Celui-ci prévoit : « *d'ici à 2030, réduire d'un tiers, par la prévention et le traitement, le taux de mortalité prématurée due à des maladies non transmissibles et promouvoir la santé mentale et le bien-être* ». Trois de ces causes de mortalité sont aussi examinées dans cette étude, parce que la pollution de l'air constitue un facteur de risque important pour celles-ci. Il s'agit des cancers, des maladies cardiovasculaires et des maladies respiratoires chroniques, trois catégories de causes qui font l'objet d'un suivi par les indicateurs de l'ODD 3.4.

1 Sur le site: <https://unstats-undesa.opendata.arcgis.com/>

D'autres grands programmes sur la pollution de l'air existent. Ainsi la Commission Economique pour l'Europe des Nations unies (CEE-ONU) ou UNECE a développé un programme fortement détaillé sur la pollution de l'air avec une stratégie opérationnelle, un plan long terme et un plan 2018-2019 très détaillé². La Commission Européenne a, elle aussi, lancé son projet de surveillance permanente de la qualité de l'air dans le cadre de son programme Copernicus³. Toutefois, aucun programme de cette ampleur ne concerne l'Afrique.

L'étude présentée ici se concentre en particulier sur Antananarivo, capitale de Madagascar et sur les différences qui peuvent être observées à une échelle spatiale fine, dans notre cas dans les quartiers de la ville. L'étude menée par Jerrett (2005) sur l'analyse spatiale de la pollution de l'air et de la mortalité, menée aux Etats-Unis (Jerrett et al., 2005), montre bien, dans sa conclusion, l'importance de l'analyse au niveau local: « *Nos résultats suggèrent que les effets chroniques sur la santé associés aux gradients d'exposition aux PM_{2,5} à l'intérieur des villes peuvent être encore plus importants que dans les régions métropolitaines.* »⁴ L'importance de s'intéresser à la pollution à une échelle locale et non uniquement sur l'ensemble d'une ville ou pays est donc déjà reconnue de longue date. Cependant, cela est encore peu étudié en Afrique (Sylla et al., 2017), et Madagascar ne fait pas figure d'exception.

Ce mémoire vise à analyser les variations spatiales de la mortalité liée à la pollution de l'air, mais également à mettre en évidence le potentiel de données non conventionnelles pour le suivi des objectifs de développement durable. En effet, les données de pollution utilisées ici ont été récoltées à l'aide de capteurs détenus de manière privée et ont été transférées vers une plateforme en *open-access* sur internet. Cette méthode fait partie des méthodes de *crowdsourcing*. L'utilité du *crowdsourcing* dans un projet tel que celui-ci permet de pallier le manque d'infrastructure officielle de collecte de données. Le *crowdsourcing* dans notre cas est rendu possible par l'internet des objets IdO (ou *Internet of things*, IoT) qui permet les échanges d'informations et de données provenant de dispositifs du monde réel avec le réseau Internet. La caractéristique

2 Programme de l'UNECE <https://www.unece.org/es/env/lrtap/welcome.html>

3 Programme Copernicus <https://atmosphere.copernicus.eu/services/air-quality-atmospheric-composition>

4 Traduction libre

principale des IdO est la possibilité de fournir l'infrastructure nécessaire à l'implantation de capteurs en utilisant des protocoles standardisés. Les applications à base de l'IdO se sont popularisées grâce à la multiplication de produits à plus faible coût et des hardware et software open source (Sudantha et al., 2018). L'importance de ces systèmes non-conventionnels ne cessera d'augmenter à l'avenir (Sudantha et al., 2018), et sont amenés à jouer un rôle croissant dans le champ du développement. Ils peuvent permettre une meilleure appropriation des données par les populations locales. Les réseaux existants sont souvent installés par des pays étrangers, qui monitorent des phénomènes globaux et non locaux et sont inaccessibles pour les citoyens. Ils ne rencontrent pas nécessairement les besoins locaux dans les pays en voies de développement, qui manquent de systèmes de monitoring efficaces, denses et modernes. Ces nouvelles technologies permettent le déploiement d'un phénomène spécifique à un niveau de grande échelle spatio-temporelle (Muller et al., 2015). La collecte de données atmosphériques par procédé de *crowdsourcing* n'est pas encore très développée et présente donc encore un grand potentiel. Il faut cependant assurer une évaluation de la qualité des données récoltées. En effet, le système de collecte des données présente plus de risques d'erreurs que celui de mesures prises par des sources officielles (Muller et al., 2015). Ceci s'explique par le fait que la collecte traditionnelle de données utilise des appareils de mesures calibrées et répondant à des standards stricts, ce qui n'est pas toujours le cas des systèmes de *crowdsourcing*. La collecte de données atmosphériques par procédé de *crowdsourcing* devrait atteindre cette précision dans l'avenir.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse de données issues du *crowdsourcing* en combinaison avec des données de mortalité issues de sources plus classiques. Il les analyse afin d'estimer leur potentiel, mais aussi leurs limites dans l'étude de l'impact de la pollution de l'air sur la santé dans les villes africaines.

Le travail présentera tout d'abord les différentes sources de pollution de l'air et les éléments mesurés afin de chiffrer cette pollution, ainsi que les causes de mortalité pour lesquelles on peut mesurer l'impact de la pollution sur la morbidité. Les études menées précédemment à Antananarivo seront présentées et finalement la question de recherche sera détaillée.

La seconde partie abordera la situation du développement et de l'environnement à Antananarivo. Une présentation de la ville sous ses différents aspects tels que sa structure sociale, sa structure géographique ou encore la mobilité de ces habitants, introduira le propos. Les différents engagements de Madagascar tant d'un point de vue international que local sur les questions environnementales seront ensuite exposés. Puis les différentes données utilisées pour cette étude seront présentées. Le mode de collecte et de traitement de ces données y seront expliqués.

Les résultats seront alors présentés, tant d'un point de vue de la méthodologie, que de la conclusion qui peut être tirée de ces résultats.

Finalement, la dernière partie s'attardera sur les limites que comporte cette étude, ce qui les engendre et ce qui pourrait permettre de les surpasser.

2. Revue de la littérature

En Afrique le nombre de morts prématurés causés par la pollution ambiante et domestique de l'air a augmenté de 36% entre 1990 et 2013, passant de 180 000 à 250 000 décès dus à la pollution de l'air (Sylla et al., 2017). D'après l'ONU le trafic routier est responsable de 90% de la pollution ambiante dans les villes en Afrique (Sylla et al., 2017)

Plusieurs études ont déjà été effectuées (Krewski et al., 2009 ; Jerrett et al., 2005) pour définir des zones de pollution au sein d'une même ville ou région, avec pour but d'examiner les différences d'exposition au plus près de la réalité des personnes exposées. Différents modèles sont créés afin d'arriver à des résultats concernant les différentes zones et leurs taux de pollution. Ils dépendent des données disponibles, qui sont plus nombreuses que celles exploitables pour ce mémoire, avec, par exemple, des données sur plusieurs années, des statistiques de circulation et des mesures d'ozone. De plus pour les analyses de mortalité Krewski et al. (2009) disposent par exemple des historiques des endroits de résidence des personnes des échantillons étudiées. Or ce n'est pas le cas non plus pour ce mémoire.

Emissions de pollution atmosphérique

Cette section définit la pollution de l'air et les différents composants présents dans celle-ci.

La pollution atmosphérique peut être définie comme « *un groupe hétérogène de substances capables de modifier la composition chimique naturelle de l'air, ce qui a un impact sur la santé humaine et l'environnement* »⁵(Cipolla et al., 2018). Pour ce travail le terme pollution de l'air, prend toujours en considération l'air extérieur ambiant, et lorsque cet air sera fortement pollué le terme *mauvaise qualité de l'air sera utilisé*. Les sources principales de pollution atmosphérique ambiante sont liées à la combustion de charbon et de pétrole, utilisés pour produire de l'énergie, le transport, le chauffage et toutes sortes d'activités industrielles (ibid.).

5 Traduction libre

Les PM_{2.5} sont des particules fines en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres (µm). Les mesures de PM_{2.5} sont des concentrations exprimées en µg/m³, soit la masse de toutes les particules (PM_{2.5}) par m³ d'air. Le degré de pénétration dans voies respiratoires est inversement proportionnel à la taille des particules, pour cela différentes mesures tailles de particules existent, dont les PM₁₀, qui sont aussi utilisées dans différentes études (Cipolla et al., 2018).

Certaines études tiennent compte de la composition chimique des particules. En effet, les matières carbonées sont plus toxiques que les matériaux crustaux, les nitrates et les sulfates (Lelieveld et al., 2015). Cependant se concentrer uniquement sur les mesures de concentration présente un avantage technique évident et est aussi le choix fait par L'OMS et les gouvernements nationaux dans leur définitions de concentration à ne pas dépasser (ibid.).

L'ozone est aussi un indicateur fortement utilisé. L'ozone est associé à l'augmentation des infections pulmonaires, de la pression artérielle et de l'action des plaquettes (Day et al., 2017). Il est un facteur important, mais ne sera pas étudié ici faute de mesures.

Les mesures de PM_{2.5} sont l'indicateur le plus robuste et fiable de mortalité dans les études à long terme (Cohen et al.). Leur influence sur la santé est surtout connue par les études épidémiologiques, ce qui veut dire que l'association est statistiquement prouvée, mais que les mécanismes sous-jacents ne sont pas tous connus (Tositti, 2018).

Causes de mortalité liées à la pollution de l'air

La section définit les différentes causes étudiées dans ce mémoire et les raisons pour lesquels elles le sont.

L'enquête *Global Burden of Disease* vise à quantifier la charge mondiale de nombreuses causes et de décès et de maladies au niveau national. Elle identifie également les principaux facteurs de risques de mortalité et de maladie et permet d'identifier les maladies qui sont les plus réactives à des variations de pollution atmosphérique.

Il existe 5 causes de mortalité principales dont les risques augmentent avec une exposition à la pollution de l'air ambiant extérieur (Institute for Health Metrics and

Evaluation (IHME), 2016 ; Cohen et al., 2017 ; World Health Organization, 2016 ; Cipolla et al., 2018). Ce sont les maladies cérébro-vasculaires, les cardiopathies ischémiques, les infections respiratoires inférieures les maladies pulmonaires obstructives chroniques et les cancers du poumon.

Selon l’OMS, 58% de la mortalité due à la pollution de l’air ambiant extérieur (toutes particules confondues) est imputable aux cardiopathies ischémiques et aux maladies cérébro-vasculaires. (World Health Organization, 2016)

D’un point de vue clinique, il est possible de constater que différents polluants augmentent la pression artérielle, ce qui augmente le risque d’événements, fatals ou non, cérébro-vasculaires et cardio-vasculaires (Gaddi, 2018). Certains polluants ont un effet irritant sur les systèmes respiratoires, en particulier les récepteurs pour la toux, ce qui cause de la toux, d’autres polluants entraînant quant à eux des réactions chimiques (Cipolla et al., 2018).

Les maladies chroniques respiratoires sont responsables annuellement de 4,2 millions de décès dans le monde, dont 80% dans des pays à revenus moyens et faibles (Sylla et al., 2017) ce qui représente au total 18% des décès liés à la pollution de l’air (World Health Organization, 2018).

Les cancers des poumons sont responsables de 6 % des décès liés à la pollution de (World Health Organization, 2018). Dans plusieurs études, il n’est pas spécifié quelles sont les causes associées à la cause synthétique dite « cancer du poumon ». Nous prendrons comme postulat que les causes sont celles de la Classification Internationale des Maladies (CIM-9, en anglais ICD-9) ICD-9 :162, c’est-à-dire le néoplasme malin des organes respiratoires et intra-thoraciques de la trachée, des bronches et du poumon. Cette définition des cancers des poumons est utilisée par Katanoda et al. (2011), qui est une des études de référence à l’article de Cohen et al., (2017), plusieurs fois cité dans ce travail.

La pertinence de cette étude vient du fait que les études épidémiologiques liées à la pollution de l’air sont nécessaires dans les villes africaines, caractérisées par une faible qualité de l’air, mais très rares, du fait de la quasi absence de données de mortalité et de pollution. Ce mémoire s’inscrit dans une perspective multidisciplinaire, né-

cessaire pour pouvoir mettre en place des programmes aux résultats effectifs (Sylla et al., 2017).

Autres études portant sur la pollution de l'air à Antananarivo

Cette section synthétise les différents points importants des études préalables menées à Antananarivo.

Il existe peu de données sur la pollution de l'air à Madagascar. Les trois dernières études publiées datent chronologiquement de 2003, 2009 et 2012 (Rakotondramanana et al., 2003 ; Rasoazanany et al., 2012 ; Randriamanivo et al., 2009). Elles permettent de vérifier certains éléments étudiés par la suite, mais montrent surtout l'insuffisance d'études menées dans ce domaine à l'échelle de la capitale malgache. Elles sont résumées ci-après, sans suivre un ordre chronologique.

Une première étude traite de la pollution en termes de $PM_{2.5}$ et PM_{10} dans la zone de Andravoahangy, situé au nord du centre de la ville (Randriamanivo et al., 2009). La campagne de récolte de données a été menée sur la période du 14 avril au 21 août 2008. Elle comprend 17 jours de mesures. Les prélèvements ont été faits à l'école publique d'Andravoahangy où le capteur a été placé à 7 mètres de hauteur. Elle est située près du centre, lieu de trafic automobile important. L'étude démontre que les taux de $PM_{2.5}$ moyens journaliers sont pour 14 jours, sur les 17 jours de relevés, plus élevés que le taux préconisé par l'OMS qui est de $25\mu g/m^3$ dans des endroits à trafic automobile important et comparable. On note aussi que ces moyennes sont fortement fluctuantes de jour en jour, de sorte que parfois entre deux jours on assiste à un doublement des valeurs de moyenne. Cela peut être dû à des éléments assez difficiles à prendre en compte d'un point de vue statistique sans données contextuelles détaillées. En effet, dans le cas qui nous occupe la journée avec la moyenne la plus élevée correspond au jour de marché et le jour où la moyenne est la plus basse est un dimanche, donc un jour de repos. Cette étude a mesuré un $PM_{2.5}$ moyen de $36.8\mu g/m^3$. L'étude conclut à la nécessité d'étendre la surveillance et le contrôle des particules fines dans toutes les zones à haute densité de population. Elle indique également qu'il faudrait entreprendre de futures études à Antananarivo afin de définir les effets sur la santé de l'exposition aux hautes concentrations de particules fines.

L'étude de Rasoazanany et al. (2012), bien que moins détaillée que la précédente, est assez similaire dans ses remarques. Pour cette étude, des mesures ont été faites à Andravoahangy, situé au nord centre de la ville, durant la période du 16 février au 30 mars 2007. Or durant 21 des 22 jours de relevés, la moyenne journalière a été supérieure à la limite du standard de l'OMS ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et les mesures oscillaient entre 21,3 et $107,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

On notera également que d'autres mesures avaient été effectuées en 2008 à Ambodin'Isotry, situé dans la zone Ouest du centre. Ces mesures laissaient apparaître des résultats inférieurs à ceux mesurés à Andravoahangy, mais l'article n'en dit pas plus, ce qui ne permet pas de l'exploiter utilement.

Enfin, l'étude de Rakotondramanana et al. (2003) est l'étude la plus ancienne. Elle se concentre principalement sur la teneur en plomb des échantillons, facteur qui, bien qu'il soit intéressant dans le cadre de la mortalité, ne sera pas considéré dans la suite de ce mémoire. Elle comporte cependant une méthodologie intéressante. D'une part, les mesures ont été prises à 6 endroits différents et on peut remarquer une grande disparité dans les mesures, ce qui est important à relever pour notre analyse, étant donné que nous cherchons à expliquer des différences de mortalité au sein même d'Antananarivo. D'autre part, l'étude de 2003 montre que la principale source d'émission est bien le trafic routier. En effet, en avril 2002, une grève générale a eu lieu et les mesures rapportées durant cette période de grève par rapport à une période normale au même endroit sont beaucoup plus basses ($136 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 1999 par rapport à $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2002).

En dépit de l'existence de ces différentes études et prises de mesure de la pollution de l'air, aucune tentative n'a jamais été faite de lier la pollution de l'air aux niveaux de mortalité par cause à l'échelle de la capitale malgache.

Question de recherche

La question de recherche centrale de ce mémoire est la suivante : « Est-il possible de mettre à jour une association significative entre la pollution dans l'air extérieur ambiant et la mortalité due aux maladies cérébro-vasculaires, aux cardiopathies isché-

miques, aux infections respiratoires inférieures, aux maladies pulmonaires obstructives chroniques et aux cancers du poumon à Antananarivo ?»

Les hypothèses centrales sont que l'augmentation de pollution a un impact sur le nombre des décès liés à ces causes et que ces causes entraînent des décès prématurés. Ces hypothèses reposent sur les études présentées précédemment dans la revue de littérature, en stipulant que des relations similaires à celles étudiées dans ces études pourront être observées dans ce mémoire.

L'étude de l'état de l'environnement à Madagascar (Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012) fait référence aux données de l'Institut National de la Statistique malgache (INSTAT) de 2010. Ceux-ci présentent un nombre plus important de cas d'infections respiratoires aiguës dans les milieux pauvres que dans les milieux aisés. Dans la répartition des types de maladies, 8,2 % des personnes malades dans les milieux pauvres avaient une infection respiratoire aiguë contre 6,8% dans les milieux aisés. Cette information, bien que peu complète, est toutefois intéressante à prendre en compte lors de l'analyse des infections respiratoires aiguës. Un double questionnaire peut alors être posé : les personnes de milieu pauvre auraient-elles plus de risque de contracter une infection respiratoire aiguë et cela en relation avec leur niveau de vie (moindre accès aux soins, moins bon accès à de la nourriture variée et de qualité, état du logement, etc.), ou bien est-ce du fait que les personnes plus pauvres habitent dans des zones plus polluées qu'elles contractent des infections respiratoires aiguës ? On peut poser comme hypothèse qu'un moindre accès aux soins va renforcer les risques de complications médicales liées à toutes les maladies qui sont des causes de mortalité, et donc aussi à celles étudiées dans cette étude.

Une hypothèse nécessaire au vu des données disponible est que les variations de concentration de $PM_{2.5}$ entre zones peuvent être considérées comme des variation de l'exposition à la pollution des habitants de cette zone. L'influence sur la santé des particules fines est déterminés par l'exposition à l'air extérieur, l'air intérieur et l'air inhalé quand une personne fume (Cipolla et al., 2018), dans l'air extérieur une personne ne respire pas seulement l'air de son lieu d'habitation.

Une autre hypothèse est que les quartiers plus pollués actuellement l'étaient déjà auparavant. Cette hypothèse est nécessaire étant donné les données de pollution atmosphériques ont été récoltées ultérieurement aux décès analysés.

3. Situation du développement et de l'environnement à Antananarivo

Présentation de la ville d'Antananarivo

Antananarivo est une ville divisée en 6 arrondissements et 192 quartiers, appelés *fokontany*. Elle est marquée par d'importantes variations en termes de relief, de densité du bâti, et de composition de la population. « *Le langage ordinaire distingue couramment la ville haute, la ville moyenne et la ville basse, pas seulement en fonction des positions altitudinales de chacune d'entre elles mais aussi en fonction des caractéristiques sociales supposées de leurs habitants.* » (Randremanana et al., 2001). La ville basse s'est développée sur d'anciennes rizières à l'Est de la capitale (Figure 1). « *Une bonne partie de ses habitations y est ainsi exposée au risque récurrent d'inondations pendant la saison des pluies et donc de maladies infectieuses ou diarrhéiques, comme le choléra ou la tuberculose* » (ibid.). Dans la partie haute d'Antananarivo, située sur la plus haute colline de la ville culminant à 1.300 mètres, sont situés la plupart des monuments historiques et le centre administratif. C'était la partie de la ville dédiée aux dignitaires tels que le démontre son appellation. Elle offre une vue dégagée sur les alentours et a été proposée à la liste indicative de l'Unesco en 2016 (UNESCO, 2016). Entre les deux zones précédentes, la ville moyenne doit son expansion à l'intégration de villages-faubourgs à la ville haute au début du XXème siècle par une population de petite et moyenne bourgeoisie malgache qui était trop à l'étroit dans la ville haute (Esoavelomandroso, 1985).

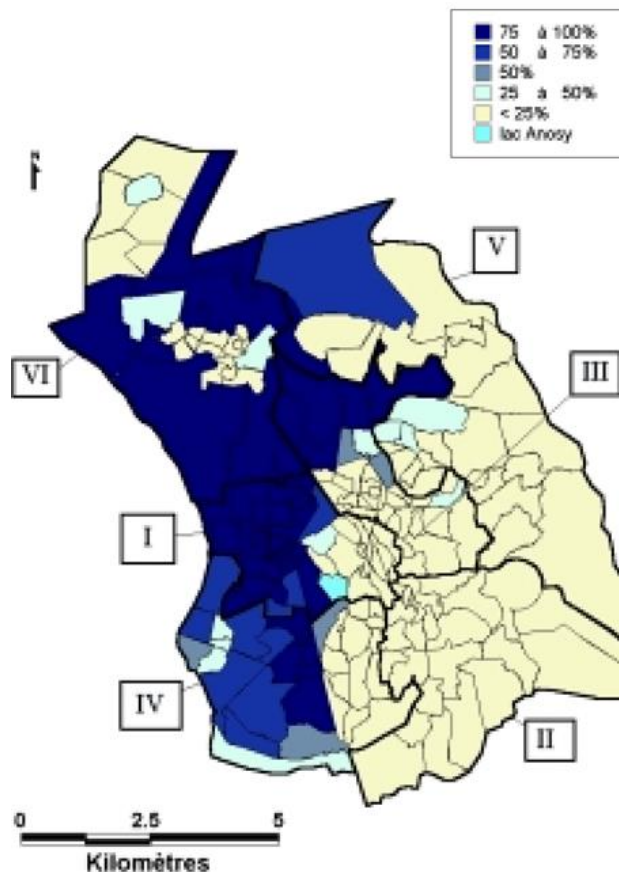


Figure 1 Pourcentage de surface inondable par Fokontany (< 1250m d'altitude) (Randremanana et al., 2001)

Un élément important pour notre étude est le fait que les habitants d'Antananarivo sont plutôt sédentaires. Un quart des adultes sont nés dans le quartier dans lequel ils habitent. Plus de 80 % d'entre eux y résident depuis plus de 5 ans avec une ancienneté moyenne de 21 ans dans le quartier. Cet ancrage dans le quartier est encore plus grand dans les quartiers pauvres, avec 36 % des habitants adultes qui y sont nés (Wachsberger, 2009). Fournet-Guérin (2007, p. 213) explique le lien fort que les habitants des quartiers ont avec celui-ci et observe aussi cette forme de sédentarité. Cette sédentarité est importante pour notre étude, car elle permet une meilleure analyse des effets sur la santé de la pollution par rapport à son quartier d'habitation, étant donné que les données de mortalité disponibles ont comme référence le lieu d'habitation de la personne au moment du décès, et non pas les différents lieux où la personne a habité au cours de sa vie.

La capitale a vu se développer en son sein une nouvelle tranche de la population clochardisée qui vit dans la misère. « *L'opinion publique, qui méprise profondément ces clochards de tous âges, les qualifie de "quat(re)-mi"* » (Hanitriniaina et al., 2012) Ils se

retrouvent principalement dans les zones très peuplées des arrondissement 1, 2 et 4, qui seront par la suite également identifiés comme les arrondissements les plus pollués de la ville.

La couverture maladie, et donc l'accès aux soins, ne concerne qu'une partie de la population. Dans la capitale, selon Wachsberger (2009), seuls 24 % des habitants bénéficient d'une couverture maladie. L'Etat, en tant employeur, totalise 39% des personnes couvertes (soit qu'elles soient elles-mêmes fonctionnaires, soit qu'un des membre de leur famille travaille dans la fonction publique) (Wachsberger, 2009). De plus, à Madagascar, les employeurs sont obligés d'adhérer à un Service Médical Inter-Entreprises. Ce sont les prestation médicales qui sont assurées par l'employeur à l'employé (Madagascar Services, 2017). Dans ce cadre, 31% des personnes couvertes le sont par l'OSTIE ou l'OSIPD et 17% par un dispensaire lié au lieu de travail. Les assurances privées sont peu nombreuses ; elles ne totalisent que 4% des personnes couvertes.

Cette faiblesse de la couverture maladie est susceptible de donner lieu à de profondes inégalités face au décès. Les personnes qui ne sont pas diplômées du supérieur ne sont que 12% à bénéficier d'une couverture maladie, tandis que 43% des personnes diplômées du supérieur en bénéficient. 45 % des personnes du quartile le plus riche, contre 13 % dans le quartile le plus pauvre ont une couverture maladie (Wachsberger, 2009), ce qui révèle une forte corrélation entre le niveau d'étude et le revenu, et de ce fait la couverture maladie.

On peut poser comme hypothèse qu'un moindre accès aux soins va renforcer les risques de complications médicales liées à toutes les maladies qui sont des causes de mortalité et donc aussi à celles spécifiquement étudiées par cette étude. L'influence de la différence d'accès à la couverture maladie n'en sera qu'augmentée dans les catégories de populations les plus pauvres.

Outre la pollution de l'air ambiant, une autre cause d'exposition aux particules fines est le tabagisme. Selon Parizot *et al.* (2009), 29 % de la population d'Antananarivo a déjà fumé dans sa vie. Une grande partie (24 %) fume encore régulièrement. On note que les hommes fument plus (27%) que les femmes (20%). Ni l'âge, ni le niveau de diplôme, ni le niveau de revenus n'ont d'influence sur les proportions de

fumeurs. Mais il y a des profils sociaux différents par rapport au genre : les hommes les plus pauvres sont plus nombreux à fumer que les hommes riches (36 % dans le quartile de revenus le plus bas, contre 23 % dans le quartile le plus haut). A l’opposé chez les femmes, la tendance inverse se profile : 17% des femmes des deux premiers quartiles fument régulièrement, contre 29 % dans le troisième quartile et 21 % pour le quatrième quartile (Parizot et al., 2005).

Malheureusement, aucune statistique par quartier ou aire géographique n’est disponible pour caractériser la fréquence du tabagisme, les éléments concernant l’exposition aux particules fines du tabac ne pourront donc pas être ultérieurement exploités.

Actions gouvernementales

Cette section examinera d’abord les engagements internationaux dans lesquels Madagascar est engagé et ensuite quelles mesures ont été prises au sein du pays.

Engagements internationaux

Madagascar s’est engagé au niveau international sur les questions environnementales dans le cadre du Protocole sur la Santé de la Communauté de Développement de l’Afrique Australe (2006). Ce protocole qui précise dans son article 23 (santé environnementale) que : « *Les Etats parties collaborent et coopèrent entre eux et s'aident mutuellement dans le cadre d'une approche transsectorielle visant à régler les questions ou problèmes de santé environnementale dans la Région, notamment les déchets toxiques, la gestion des déchets, les services sanitaires portuaires, la pollution de l'air, des sols et des eaux, ainsi que la dégradation des ressources naturelles.* » Même si la pollution de l’air est mentionnée dans ce protocole, elle ne l’est qu’une seule fois sur un document comptant 39 articles. Elle ne semble pas, par ailleurs, avoir été suivie de programmes concrets. Aucune mesure prise dans le sens d’une coopération entre Etats sur la lutte contre la pollution de l’air n’a pu être retrouvée dans le cadre de cette étude.

Le constat est posé. A Madagascar, comme dans toute l’Afrique Australe, le phénomène de « *la pollution de notre environnement (...) est devenu un problème majeur et urgent du monde là où l’on vit actuellement et (...) devrait être résolu de toute ur-*

gence pour le bien être de notre génération future ». Mais les moyens manquent et l'appel est lancé au niveau des Nations Unies de l'Environnement : *« des avancées ont été constatées sur la gestion du problème de l'environnement mais beaucoup reste encore à faire, et nécessite l'effort soutenu de tout un chacun pour renforcer la dynamique de nos interventions en cours et appuyer les alternatives ou initiatives nouvelles qui méritent d'être développées »* (Ramiandrarivo, 2017)

Madagascar a pris part à la 3^{ème} session des Nations Unies de l'Environnement des 4 au 6 décembre 2017 à Nairobi et à cette occasion M. Liva Ramiandrarivo, Secrétaire général du Ministre de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, a réaffirmé que *« La lutte contre la pollution nous tient vraiment à cœur et constitue l'une des priorités de la Politique de notre pays »*(Ramiandrarivo, 2017).

Lors de cette conférence, un projet de résolution sur la prévention et la réduction de la pollution atmosphérique pour améliorer la qualité de l'air à l'échelle mondiale a été établi par l'assemblée des Nations Unies pour l'environnement (UNEP, 2017). Elle rappelle la résolution 1/7 de l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement par laquelle cette assemblée a approuvé le renforcement du rôle du Programme des Nations Unies pour l'environnement dans la promotion de la qualité de l'air et a vivement encouragé les États membres à prendre des mesures pour lutter contre la pollution atmosphérique. Elle réitère l'appel adressé aux États membres afin qu'ils prennent des mesures multisectorielles pour réduire la pollution atmosphérique sous toutes ses formes et notamment :

- en mettant en place des systèmes appropriés de surveillance de la pollution atmosphérique,
- en intégrant et renforçant les aspects liés à la gestion de la pollution atmosphérique dans les programmes de développement nationaux,

Le Directeur exécutif de l'UNEP est notamment prié de *« de continuer d'aider les pays, en particulier les pays en développement, à mettre en place, à des coûts abordables, des réseaux de surveillance de la qualité de l'air, afin de sensibiliser le public aux niveaux de pollution et à leur impact sur la santé humaine et l'environnement, et d'évaluer, à l'échelle régionale, les besoins en matière de capacités en exploitant les données fournies par les communautés de pratiques »*(UNEP, 2017). La tâche est ambi-

tieuse et il sera intéressant de suivre les avancé de la réglementions malgache en la matière.

Mesures locales de la pollution de l'air

Cette section aborde les sources de pollution de l'air et les mesures déjà prises par le gouvernement.

Il est à noter que les sources principales d'énergie en ville restent le bois de chauffe et le charbon de bois (Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012) et « 68 % de la production électrique en termes de puissance installée, sont d'origine thermique utilisant, soit du gasoil, soit du fuel lourd » (ibid.)

Dans le cadre de sa Politique Nationale de l'Environnement pour le Développement Durable, le gouvernement malgache retient comme enjeu principal « *la réduction des risques environnementaux et sanitaires liés aux différentes pollutions occasionnées par les besoins de développement social et économique* » (Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012). Cependant, malgré cette déclaration, peu de choses sont mises en place sur le terrain afin d'atteindre cet objectif.

Les questions environnementales sont aussi fortement présentes dans le Plan National de Développement 2015-2019 (PND). Cependant aucune mesure n'est envisagée pour la diminution de la pollution de l'air en milieu urbain. Il y est simplement mentionné que : « *Sur les voies routières, les véhicules consommant le gasoil sont majoritaires. [...] Par conséquent, le secteur du transport (secteur tertiaire) consomme plus de 80% du gasoil que le pays importe, avec les conséquences que l'utilisation de cette catégorie de carburant peut apporter sur le plan environnemental et sur la santé de la population* » (Madagascar, 2015). Bien que le constat soit posé, aucune mesure concrète n'est proposée.

Pour arriver à contenir la pollution de l'air, Madagascar, et particulièrement Antananarivo, devrait se doter d'un arsenal juridique ambitieux permettant de diminuer la concentration de particules fines. Lors de recherches dans les différentes réglementations malgaches, une seule mesure peut être identifiée qui vise à restreindre l'impact de la pollution causée par les véhicules (Rakotondramanana et al., 2003). Il s'agit d'une mesure de contrôle des gaz d'échappement des véhicules. Ce contrôle est sous la res-

ponsabilité de la Direction Générale de la Sécurité Routière. Il a lieu lors des visites techniques des véhicules. Cette mesure a été prise par la Convention de Partenariat No. 66/99/ONE entre le Ministre chargé de l'Environnement et le Secrétaire d'Etat chargé de la Gendarmerie (Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012).

Un ensemble de mesures plus important a toutefois été mis en place pour les installations industrielles. L'évacuation des fumées des chaudières doit être placée à une hauteur de minimum 20m (Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012). Cela est encore renforcé par le « *contrôle permanent des émissions gazeuses provenant d'installations industrielles, effectué par les autorités compétentes afin de vérifier la conformité aux valeurs limites des rejets gazeux* » (Assemblée Nationale, 2015).

La tâche est immense et les moyens limités. Le Secrétaire général du Ministre de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, M. Liva Ramiandrarivo (2017), l'a d'une certaine façon reconnu lors de son intervention auprès des Nations Unies dans le cadre de la 3^{ème} assemblée des Nations Unies de l'Environnement à Nairobi du 4 au 6 décembre 2017. Il y indique que le rythme accéléré de la dégradation de l'environnement malgache est « *dû à plusieurs facteurs dont les principaux sont le phénomène de la pauvreté élevé de la population, le problème de gouvernance, et l'insuffisance des moyens matériel et financier qui conditionnent la portée des actions entreprises et à entreprendre* ».

4. Présentation des données

Données de pollution de l'air

La collecte des données

Cette section présente les techniques utilisées pour la collecte des données de pollution de l'air, ainsi que les avantages et limites de celles-ci.

La collecte de données sur la pollution atmosphérique est en train de changer de paradigme. A la place de mesures fixés sur des bâtiments, les prises de mesure se font de plus en plus via des capteurs de pollution de l'air portables, peu coûteux, et qui transmettent vers des serveurs des données en temps réel à une résolution très élevée. Ce changement de paradigme a le potentiel de révolutionner le suivi de la pollution de l'air.

Les données de pollution de l'air ont été collectées à l'aide de capteurs Airbeam (<http://aircasting.org/>). Ces capteurs utilisent une méthode de diffusion de la lumière pour mesurer les particules fines. Les données sont mesurées par les capteurs Airbeam, puis transmises à une application mobile, à partir de laquelle elles sont envoyées vers la plateforme en ligne Aircasting. Cette utilisation d'appareils mobiles pour faire le lien entre le capteur et la plateforme permet de fortement réduire les coûts des prises de mesure, grâce aux technologies rendues peu chères par la massification des appareils mobiles et de leur GPS, bluetooth et connexion internet. Les données collectées ici sont la masse des PM_{2.5}, exprimés en μg de particules par m^3 d'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). La plateforme permet de récolter d'autres données, telles que l'humidité et la température, qui dépendent des capteurs utilisés, mais qui ne sont pas présents dans le Airbeam. À Antananarivo, les capteurs ont été installés par la société de transport de marchandises DHL, dans le cadre de la promotion de la responsabilité sociale de cette entreprise. Ils ont été disposés sur les véhicules du transporteur, qui sillonnent la ville pour des livraisons, ce qui permet de récolter des données dans toute la ville. Ces données sont répertoriées en sessions de prélèvement de données, elles-mêmes au nombre de 686 sessions, ce qui a permis de totaliser une récolte de 11.505.464 données, soit en moyenne 16.747 données par session. Cependant, le nombre de prises de mesure re-

cueillies est variable à l'échelle de la ville. La carte ci-dessous (Figure 2) montre le nombre de sessions qui ont prélevé des données par quartier, avec un maximum de 30 et un minimum de 0 sessions de prélèvement par quartier. La zone de mesure de base pour cette étude est le quartier (*fokontany*), car ces quartiers sont aussi la base sur laquelle les données de mortalité sont disponibles (cfr infra). Toutefois, comme ces quartiers sont très nombreux (192), nous disposons d'un faible nombre de sessions par quartier. Pour l'analyse statistique, les données seront donc regroupées en trois zones, afin d'augmenter le nombre de sessions et donc d'obtenir des résultats plus robustes moins sensibles aux variations aléatoires.

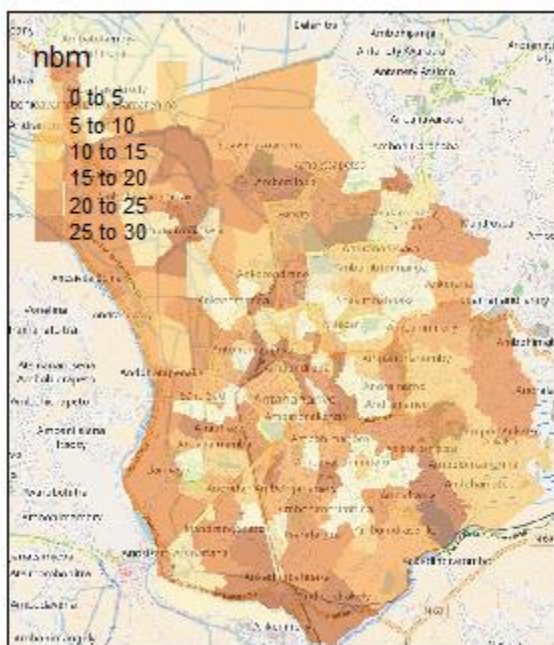


Figure 2 Carte présentant le nombre de sessions par quartier. Sc : aircasting.org, nos calculs.

L'avantage principal de ce mode de collecte des mesures de la qualité de l'air est sa capacité à couvrir un grand territoire sans nécessiter l'installation d'un nombre important de capteurs fixes. Toutefois, cet avantage a aussi un revers d'importance : le fait de ne pas avoir de capteurs fixes ne permet pas d'observer l'évolution de la pollution à partir d'un endroit de référence sur la durée.

De plus, comme le nombre de sessions est particulièrement bas dans certains quartiers, l'échantillon des mesures disponibles est fortement dépendant des moments de prélèvement. Si le prélèvement a lieu à un moment où toute la ville est fortement polluée (par exemple à cause de conditions climatiques particulières), les mesures pour les quartiers prélevés ce jour-là seront particulièrement hautes. La raison n'en est pas

alors la pollution globalement plus élevée du quartier, mais bien le moment du prélèvement. Pour atténuer les variations aléatoires associées au moment du prélèvement, une moyenne des données a été préférée à une prise en compte des pics de pollution. La moyenne permet de lisser les données et de diminuer l'impact des pics de pollution.

Cependant, cette récolte de données via crowdsourcing, quasiment en temps réel, présente un avantage en ce que les données disponibles sont beaucoup plus nombreuses (plus de 11 millions de données) et elles ont été collectées sur une période plus longue (1 an) que les autres études faites à Antananarivo qui n'avaient qu'1 à 6 lieux de prélèvement et dont la durée de prélèvement n'étaient que d'1 jour à 3 mois. Cela permet une meilleure couverture de l'entièreté de la ville et une récolte de données à différentes saisons.

Il peut être noté ici sans s'y attarder que la méthode de collecte ne permet pas de connaître la composition chimique des particules de $PM_{2.5}$. Elle les considère donc comme toutes toxiques de manière égale. Bien que la connaissance de la composition des particules soit un facteur important de leur dangerosité (Lelieveld et al., 2015), beaucoup d'études et recommandation n'étudient pas la composition des $PM_{2.5}$ mesurés (Cohen et al., 2017 ; Di et al., 2017 ; World Health Organization, 2016).

Exploitation des données

Cette section explique la méthode de calcul pour obtenir une moyenne par quartier et ensuite par zone, ainsi que la manière dont ces zones ont été définies.

Dans le cadre de ce mémoire, après avoir extrait les données de la plateforme, des calculs de moyenne par zone (quartier ou plus grandes zones, définies par la suite) ont été effectués en faisant la moyenne des relevés par session dans la zone. Une moyenne des moyennes des différentes sessions ayant offert des données pour la zone considérée est ensuite calculée pour ne retenir qu'une seule valeur pour la zone (cfr Annexe 2).

Cette moyenne des moyennes permet, par rapport à une autre approche, qui consisterait simplement à prendre la moyenne de toutes les mesures dans la zone, de ne pas favoriser les sessions plus longues par rapport aux sessions plus courtes et donc de ne pas introduire de biais qui seraient associés à différents moments de récolte des

données. Ces moyennes ne sont pas égales aux moyennes d'exposition des individus aux polluants. Mais elles permettent de saisir des variations entre zone, et donc de marquer la différence entre les différents endroits de la ville. Il est important de rappeler (cfr. Hypothèses) qu'elles ne prennent pas en compte les cas de la pollution domestique et du tabagisme. Cette méthode de calcul, par ailleurs, ne prend pas en compte les différents jours où les mesures ont été prises ce qui aurait permis de contrôler une éventuelle confusion due au fait que certains jours sont associés à des pollutions plus élevées, et que certains quartiers ont été plus systématiquement mesurés certains jours. Cela n'est cependant pas possible au vu du faible nombre de données disponibles par quartier.

La première étape est de calculer la valeur moyenne de la concentration de $PM_{2.5}$. Les résultats sont visibles sur la Figure 3.

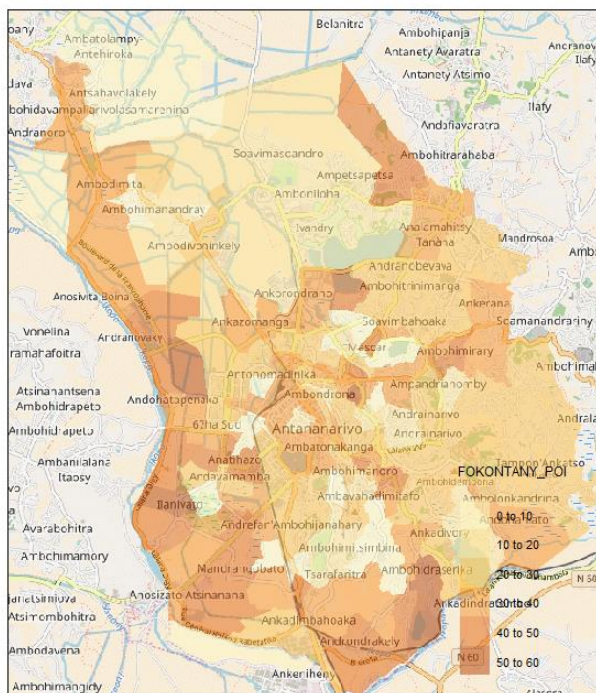


Figure 3 Carte avec les moyennes calculées par quartier. Les quartiers en blanc sont ceux pour lesquels aucune donnée n'est disponible.

L'objectif suivant sera de créer trois zones afin d'effectuer les analyses de mortalité sur ces zones. En effet, les estimations de mortalité par cause et par quartier sont très volatiles, du fait des faibles effectifs. Afin de constituer trois zones, les quartiers vont être regroupés à l'aide de deux analyses de classification avec la méthode de calcul de Ward. Le but d'une analyse de classification est de rassembler les quartiers qui se ressemblent dans une même classe, en minimisant les différences au sein des classes et

en maximisant les différences entre classes. Pour cette analyse, la valeur moyenne des moyennes par quartier a été attribuée aux quartiers sans données. Les deux facteurs pris en compte pour constituer les classes sont la moyenne par quartier et la proximité. Cette dernière est définie par deux facteurs : la latitude et la longitude des centroïdes des quartiers. La concentration de particules est représentée par la moyenne par quartier, en surreprésentant cette variable avec un facteur afin que son poids dépasse un 1/3 dans l'analyse. Les paramètres sont normalisés avant de mener l'analyse en classification. Cette première approche permet de différencier 20 petites zones presque continues (Figure 4).

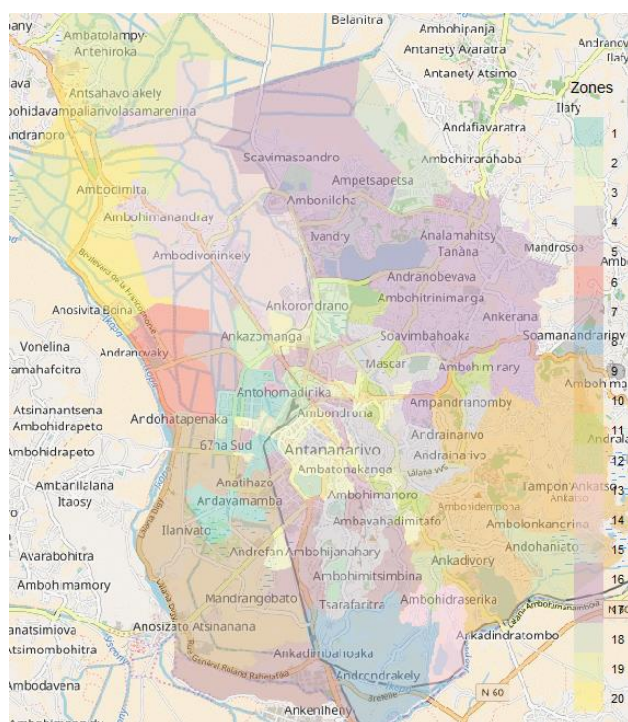


Figure 4 Carte division en 20 zones par la première analyse de classification

La seconde analyse topologique est ensuite faite sur ces 20 zones avec comme paramètre unique la concentration moyenne des petites zones. De cette seconde analyse de classification, il est possible de différencier 3 grandes zones, avec une moyenne de concentration de zones bien distinctes. La zone à « haute » pollution connaît une moyenne de $43,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$; la zone de « moyenne » pollution $29,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et la zone « basse » $15,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En guise de comparaison l'étude de synthèse de Beelen et al. (2014), qui se concentre sur un plan à échelle bien supérieur qu'ici, car il analyse des études sur toute l'Europe et les Etats Unis, obtient une augmentation de risque pour toutes les causes de mortalité avec une significativité statistique dès une différence de

5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentration de $\text{PM}_{2.5}$. L'échelle étant ici beaucoup plus petite, il est nécessaire d'avoir une plus grande différence.

Cette méthode permet par ailleurs de créer des zones avec une certaine continuité par rapport à une méthode uniquement basée sur des tranches de moyenne de concentration. Un trop grand morcellement créerait des zones non continues. Or un éparpillement des quartiers peut poser un problème. En effet, chaque mesure a été affectée à un quartier, mais parfois certaines mesures d'un quartier limitrophe sont plus proches des mesures de l'habitation de certains habitants du quartier que les données de son propre quartier. Une certaine continuité de zone dans les quartiers qui n'ont pas des valeurs totalement opposées paraît donc souhaitable. Cependant un certain nombre de quartiers (surtout au centre) se retrouvent quand même isolés (cfr. Figure 5).

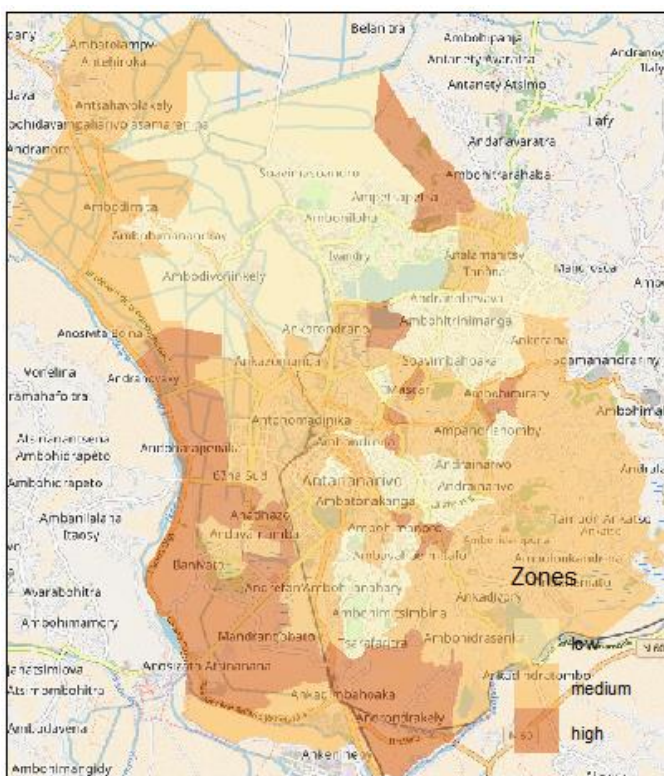


Figure 5 Contours des trois zones de pollution identifiées dans cette étude

La carte montre une zone fortement polluée au Sud-Est, une zone peu polluée au Nord de la ville et puis des zones moyennement polluées entrelacées de zones peu ou fortement polluées sur le reste de la carte. La zone fortement polluée au Sud-Est de la ville correspond fortement à la partie inondable avec une population plus précaire (Figure 1). Cependant la partie nord correspond à la zone moyennement polluée.

Données de mortalité

La base de donnée de mortalité a été constituée sur base de tous les registres du Bureau Municipal d'Hygiène (BMH) de la ville, de 1976 à 2015 (Masquelier et al., 2014). Le BMH, avec l'intervention d'un médecin établit une fiche de constat de décès où figure 14 information dont plusieurs nous intéressent pour cette étude : la date de naissance et de décès du défunt, le quartier de résidence du défunt ainsi que la première et seconde cause de décès déclarée (Waltisperger et al., 1998). Les causes ont été codées selon la classification des maladies ICD-9. Cette base de données contient environ 300 000 décès, un nombre qui s'élève à près de 250 000 décès si les individus qui ne résident pas à Antananarivo sont exclus. Parmi ces décès, seuls les 72 000 décès se référant à la période de 2005 à 2012 sont analysés dans la présente étude.

La base de données a été retravaillée par le Pr. Bruno Masquelier⁶ afin de recoder les causes de mortalité, pour tenir compte de la présence de causes de décès identifiées comme garbage codes dans l'enquête GDB, qui sont divisés en 4 catégories. Ces codes ne contiennent pas uniquement les causes identifiées comme « non-définies » dans la classification internationale des maladies. Ils contiennent aussi les causes qui ne peuvent pas être considérées comme une cause initiale de mortalité, mais qui sont une conséquence d'une cause initiale définie et qui doivent ainsi être recodées. Par exemple, l'insuffisance respiratoire et l'embolie pulmonaire ne devraient pas être considérées comme des causes initiales de décès ; elles ont une cause sous-jacente qui a précipité la chaîne d'événements menant au décès. Ici c'est la liste de causes du Global Burden of disease (GBD) 2016 qui a été utilisée comme référence. Une méthode en 7 étapes a été utilisée afin d'assigner ces garbage codes. Les garbage code de niveau 4 ont tout d'abord été réattribué à des causes acceptable de niveau 3. Par exemple la bronchopneumonie, organisme non spécifié (485) a été assignée aux infections des voies respiratoires inférieures. Ensuite les étapes de 2 à 5 consistent à attribuer à certaine décès une autre cause en utilisant des paramètres tels que l'âge, le sexe, le pro-rata des causes associées et/ou la décennie de décès. Les causes classées comme *garbage codes* traitées ainsi sont les *maladies cardiovasculaires mal définies*, les *néoplasmes mal définies*, les *causes du chapitre 16 du ICD-9* et les *blessures indéterminées*

6 Les informations présentées dans ce paragraphe proviennent du Pr. Bruno Masquelier

(qu'elles aient été infligées accidentellement ou intentionnellement (codes ICD-9 E980-989)). Pour tous les autres *garbage codes* de niveau 3 représentés dans la base de données et pas présentés dans la liste précédente, une cause la plus probable de niveau 2 a été définie. Les autres codes de la ICD-9 étiquetés comme *garbage codes* ont été redistribués au prorata selon l'âge, le sexe et l'année aux causes de niveau 3 dans chaque cause de niveau 2. Enfin, tous les *garbage codes* qui n'avaient pas été redistribués au cours des étapes précédentes ont été redistribués au prorata selon l'âge, le sexe et la décennie de décès pour toutes les causes de décès.

5. Résultats

Proportion de décès dus aux causes identifiées

Cette section décrit la méthode utilisée afin de déterminer s'il existe une association significative entre les zones polluées et la mortalité en termes d'augmentation du nombre de décès.

Dans une première étape, la comparaison des trois zones présentées ci-dessus a été faite en termes de mortalité liée aux causes identifiées, en calculant la proportion de décès dus à ces causes identifiées parmi l'ensemble des décès. Cette proportion a été établie par catégorie d'âge. La structure par âge de la population exposée au risque de décès n'étant pas disponible, car le dernier recensement date de 1993, il n'est pas possible de calculer des taux de mortalité par âge, ni de standardiser ceux-ci à l'aide d'une structure qui serait retenue comme standard. Or, la fréquence des différentes causes de décès va varier par âge. Les personnes âgées sont notamment plus susceptibles de décéder de causes non transmissibles que les jeunes enfants, plus sensibles aux maladies infectieuses. Le fait de calculer les proportions par groupes d'âge au décès et non sur la totalité des décès dans la zone, permet de pallier, en partie, le manque de données et d'éviter, autant que faire se peut, une éventuelle confusion. En effet, si la structure de la population d'une zone était différente des autres zones et que les proportions étaient calculées sur tous les décès, on pourrait erronément attribuer les variations entre zones à des effets de la pollution, alors qu'elles pourraient refléter les variations par âge de la population.

Les proportions de décès ont donc été calculées pour les groupes d'âge suivants : 0-14 ans, 15-59 ans, 60 et +. Le caractère significatif des variations entre les proportions et donc de l'occurrence entre deux variables qualitative, la zone et la cause de mortalité, a été vérifié à l'aide du test de χ^2 , en retenant un seuil de $p < 0,01$. On retient un test de χ^2 car il ne s'agit pas de faire un test de moyenne, mais de croiser le fait d'être décédé d'une cause donnée, et le type de zone de pollution, nous traitons donc bien deux variables qualitatives. Le test de χ^2 permet de démontrer statistiquement que la différence de fréquence entre les zones n'est pas due au hasard. Ce test est réalisé pour 15 combinaisons différentes, puisque nous croisons 3 groupes

d'âges et 5 causes. Il ressort du test que 3 combinaisons de groupes d'âge et de causes de mortalité présentent des variations significatives entre zones : les plus de 60 ans décédés de maladies cérébro-vasculaire, les moins de 14 ans décédés d'infections des voies respiratoires inférieures et les 15-59 ans décédés de cancers de la trachée, des bronches et du poumon. Les proportions respectives sont présentées dans les Figure 6, Figure 7 et Figure 8.

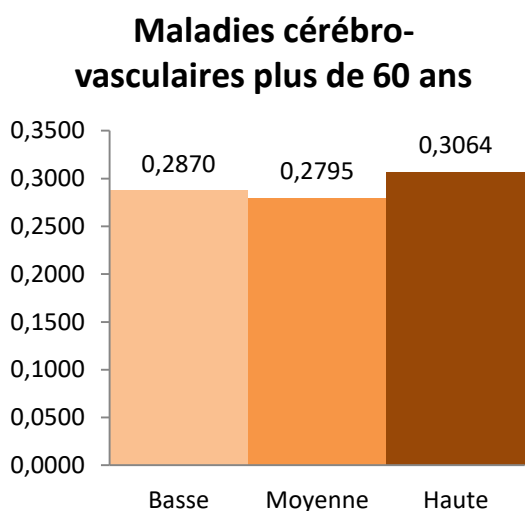


Figure 6 Proportion de décès causés par des maladies cérébro-vasculaires chez les personnes de plus de 60 ans, selon les zones de la ville

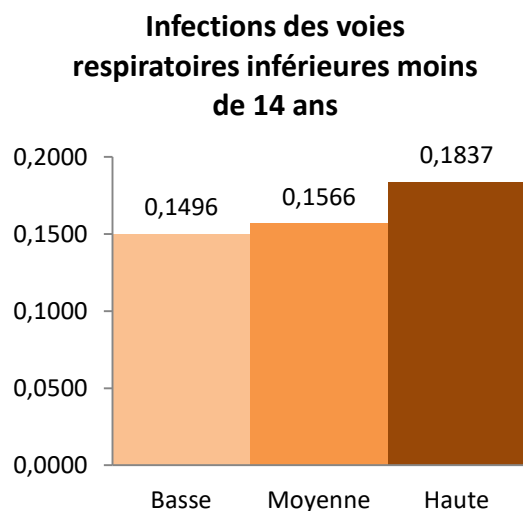


Figure 7 Proportion de décès causés par des infections des voies respiratoires inférieures chez les personnes de moins de 14 ans, selon les zones de la ville

Analysons tout d'abord les décès des personnes de plus de 60 ans dus aux maladies cérébro-vasculaires. La proportion des décès dans cette catégorie d'âge liée à cette cause est d'environ 30% des décès dans l'ensemble de la capitale (voir Figure 6), ce qui en fait la cause principale de décès dans cette catégorie d'âge, alors que dans la catégorie d'âge des plus jeunes, cette cause est presque inexistante. Cependant d'après l'enquête Global Burden of Disease (GBD) (Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), 2016), à Madagascar, la proportion de décès causés par des maladies cérébro-vasculaires est de 35,6% à 40,3% pour les 50 à 69 ans et même de 41,3% à 46,7% pour les plus de 70 ans, ce qui est nettement plus élevé que ce qui est estimé ici, même en considérant les 30,6% observés dans l'étude pour la zone fortement polluée. Les deux chiffres par proportions étant les deux extrémités de l'intervalle d'incertitude présentée pour chaque estimation (Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), 2016). Les chiffres de ces deux catégories du GBD sont présentés ici parce que les catégories

d'âge utilisés dans ce mémoire sont différentes de celles disponibles dans les estimations du GBD.

Pour les moins de 14 ans, ce sont les infections des voies respiratoires inférieures qui sont aussi une des causes principales de mortalité avec environ 15% des décès. A Madagascar, les LRI sont d'après les estimations du Global Burden of Disease responsables, pour les moins de 5 ans, d'une proportion des décès de 9,8% à 17,7% et pour les moins de 20 ans de 10 à 16,6. Même si les chiffres ne correspondent pas exactement à la même tranche d'âge que celle de référence dans la présente étude, ils permettent de constater que, dans le cas de la capitale, on arrive à des proportions dans les estimations hautes de l'enquête GBD, voire même au-dessus de l'estimation haute dans les quartiers hautement pollués avec un pourcentage de 18,4%. L'estimation du GBD (ibid.) montre également que les LRI sont une cause de mortalité plutôt infantile, car le pourcentage tombe à 6,5% pour les adultes (14-49 ans). Cette cause étant une cause principalement infantile, le fait qu'une différence significative soit observée pour cette tranche d'âge dans notre étude est donc plus important que si elle était pour d'autres tranches d'âge, car la proportion de décès causés par les LRI y est plus importante chez les enfants.

Cancers de la trachée, des bronches et du poumon 14-59 ans

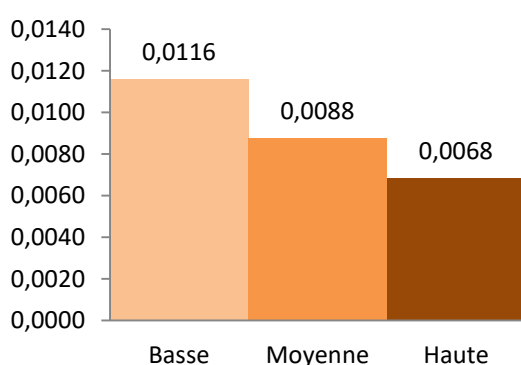


Figure 8 Proportions de décès par des cancers de la trachée, des bronches et du poumon chez les personnes de 14-59 ans dans les trois zones

En ce qui concerne les cancers de la trachée, des bronches et du poumon chez les adultes (14-59 ans), la combinaison laisse apparaître un sens contraire à celui attendu.

En effet, les cancers de la trachée, des bronches et du poumon chez les adultes (14-59 ans) sont plus fréquents dans la zone identifiée comme faiblement polluée. Toutefois, ces décès représentent une très faible proportion de l'ensemble des décès adultes, ce qui permet de relativiser l'importance de ce résultat contre-intuitif. Ces cancers représentent en effet moins d'un pourcent des décès chez les adultes en moyenne et ce dans l'ensemble des trois zones.

Age moyen au décès dus aux causes identifiées

Comme il est impossible de calculer des taux de mortalité dus aux causes de mortalité identifiées, en raison de l'absence d'effectifs de population désaggrégés par âge pour les différents quartiers, nous optons pour un second type de mesure qui consiste à associer la pollution et la mortalité par cause tout en tenant compte de l'âge au décès. Pour cette seconde mesure, l'âge moyen de décès a été calculé pour chaque zone et chaque cause. Un âge moyen au décès pour une certaine cause qui serait inférieur dans une zone plus polluée que celle à laquelle on la compare permet ainsi d'arriver à une approximation du nombre d'années de vie perdues en raison de la différence de pollution entre les zones.

Une différence significative ($F < 0,01$), calculée avec un test statistique ANOVA a été constaté pour les infections respiratoires inférieures et les maladies cérébro-vasculaires. Les données sont ici représentées dans des boîtes à moustaches qui montrent, d'une part, la répartition des âges de décès du premier au troisième quartile et d'autre part, la médiane des âges au décès. Au centre, le point rouge représente la moyenne (indiquée sur le graphique).

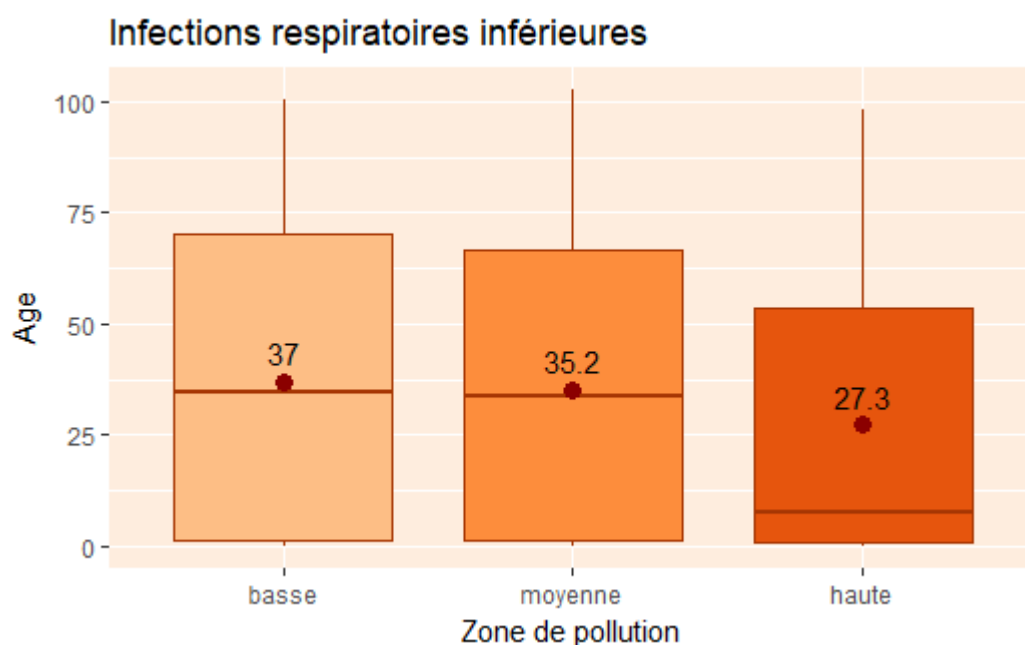


Figure 9 Boîtes à moustaches et moyenne d'âge au décès pour les décès causés par les infections respiratoires inférieures

Pour les infections respiratoires des voies inférieures, le diagramme représente bien une concentration des décès imputables à cette cause à des âges plus jeunes dans la zone hautement polluée, par rapport aux deux autres zones. Cette tendance fait chuter la moyenne et explique donc la significativité des différences de moyennes.

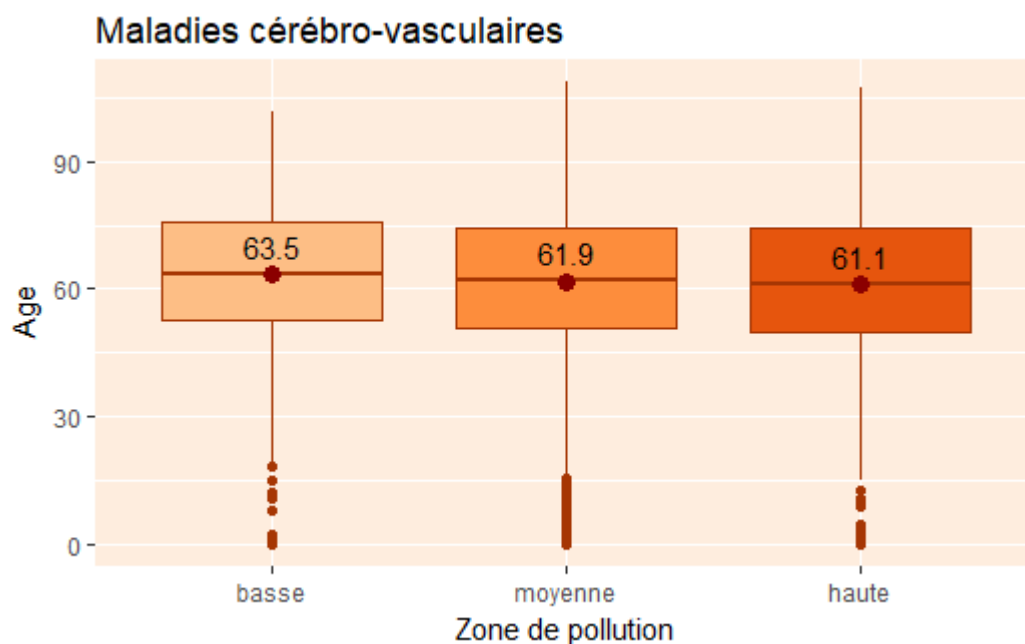


Figure 10 Boîtes à moustaches et moyenne d'âge au décès pour les décès causés par des maladies cérébro-vasculaires

Les décès dus aux maladies cérébro-vasculaires ont aussi une moyenne d'âge au décès plus basse dans la zone hautement polluée que dans les autres zones. Cela est d'autant plus marquant qu'il y a aussi une proportion de décès plus élevée chez les plus de 60 ans par rapport à d'autres zones, ce qui devrait donc faire monter la moyenne. En d'autres termes, on peut exclure ici l'hypothèse selon laquelle ces variations entre zones reflètent des différences dans la composition par âge des trois zones considérées.

Il est toutefois difficile de conclure pour l'ensemble des causes à un effet de la pollution. En effet, de telles variations significatives sont également observées avec d'autres causes qui n'ont pas été identifiées au préalable comme sensibles à la pollution atmosphérique. Ainsi, les cancers des cervicales, les cirrhoses et les maladies du foie, les maladies diarrhéiques, les autres maladies cardiovasculaires et circulatoires et certains problèmes neurologiques ont aussi une différence significative. Cela signifie que les trois zones identifiées présentent des profils épidémiologiques assez contrastés, qui ne se réduisent pas à des variations en matière de pollution de l'air.

Lorsque nous examinons les âges aux décès par cause, nous observons un âge plus jeune pour les maladies diarrhéiques, avec une différence importante puisque la moyenne d'âge est de 20,5, 17,5 et 12,6 respectivement dans les zones, peu, moyennement et fortement polluées. Une des causes à attribuer à cette différence est qu'une grande partie de la zone polluée se trouve dans la zone basse de la ville où « *une bonne partie de ses habitations y est ainsi exposée au risque récurrent d'inondations pendant la saison des pluies et donc de maladies infectieuses ou diarrhéiques, comme le choléra ou la tuberculose* » (Randremanana et al., 2001). De plus au vu de ces chiffres et de l'occurrence des infections respiratoires inférieures, on peut supposer que les jeunes représentent une plus large part de la population dans ces quartiers comparé à ceux des deux autres zones.

Pour les autres causes, l'explication est plus compliquée et remet quelque peu en cause la pertinence des résultats pour les causes liées à la pollution de l'air.

Tableau récapitulatif

Les différentes associations sont reprises dans le Tableau 1. Il permet de visualiser le peu d'associations significatives déterminées lors des deux tests statistiques effectués.

Causes considérées	Proportions des décès			Age moyen au décès
	0-14	15-59	60+	
Maladies cérébro-vasculaires	PS	PS	S+	S+
Cardiopathies ischémiques	PS	PS	PS	PS
Infections respiratoires inférieures	S+	PS	PS	S+
Maladies pulmonaire obstructive chroniques	PS	PS	PS	PS
Cancers du poumon	PS	S-	PS	PS

Tableau 1 Récapitulatif des résultats. PS : pas significatif, S + significatif dans le sens attendu, S- significatif dans le sens contraire à celui attendu

Analyse des résultats au regard de l'étude de Cohen et al. (2017)

Cohen et al. (2017) ont utilisé des fonctions intégrées exposition-réponse (integrated exposure–response functions, IERs) pour évaluer la charge de la maladie attribuable à la pollution de l'air. Ces fonctions mettent en lien des estimations de risque relatif de mortalité avec les concentrations en PM_{2.5}. Pour l'estimation de moyenne de PM_{2.5}, on prend en compte la pollution de l'air ambiant, la pollution de l'air domestique et la consommation passive et active de tabagisme. Les études prises en compte pour créer ces fonctions sont toutes des études conduites aux USA ou en Europe de l'Ouest. Cette donnée est importante car la prise en charge des soins et l'accessibilité à certains soins sont totalement différents dans ces contextes de la situation à Madagascar.

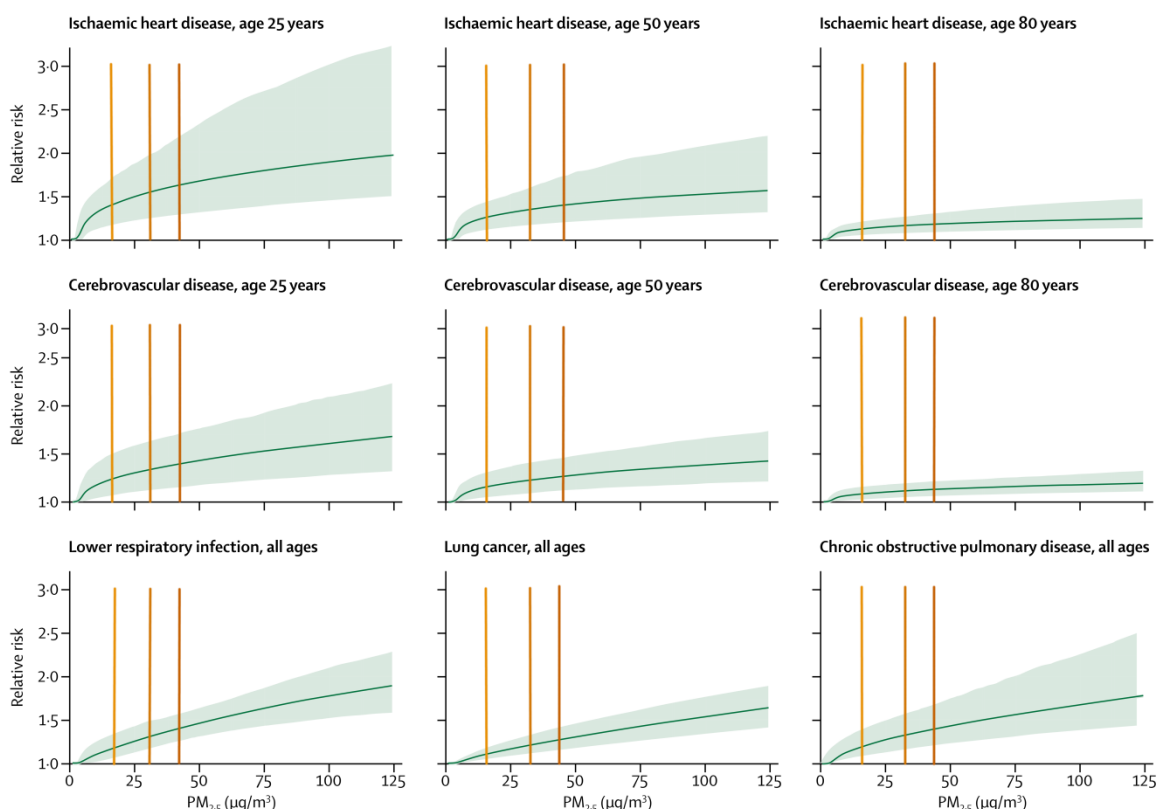


Figure 11 Fonctions intégrées exposition-réponse (Cohen et al., 2017)

« Les courbes montrent l'estimation de l'exposition-réponse intégrée (les traits pleins) et leur 95% d'incertitude (les zones grisées). Le risque relatif est égal à 1 pour les concentrations de PM_{2.5} de 0 à 2,4 µg/m³ (la limite inférieure de la distribution du niveau d'incertitude du risque théorique minimum). » (traduction libre, Cohen et al., 2017). Les lignes orangées représentent les valeurs moyenne des trois zones de l'étude (zone basse 15,50, zone moyenne 29,12 et zone haute 43,17 µg/m³)

L'étude de Cohen et al. (2017) synthétise les différents résultats des cas étudiés dans la Figure 11. Les différentes courbes représentent l'estimation de l'exposition aux PM_{2.5} par rapport à l'augmentation du risque relatif de mortalité. La courbe principale est le tracé d'un trait plein et l'incertitude sur ces résultats est représentée par les zones grisées. Les lignes verticales correspondent aux concentrations mesurées dans les trois zones à Antananarivo. Elles ont été superposées aux diagrammes afin de donner une idée des concentrations présentes à Antananarivo et de l'augmentation du risque qui peut être attendu.

Les intervalles d'incertitude de la Figure 11 sont si larges pour les différentes causes de décès, que si ces valeurs du risque relatif s'appliquaient à Antananarivo, avec le même degré d'incertitude, il serait difficile de mettre en évidence des variations significatives entre les trois zones en matière de mortalité. En effet, le risque re-

latif minimum de la zone à haute pollution et le risque maximum de la zone à basse exposition se retrouvent systématiquement dans le degré d'incertitude.

Les cardiopathies ischémiques (une des causes soumises à l'étude) et les différences en proportion et en moyenne d'âge de mortalité n'étaient pas significatives dans notre zone d'étude. On aurait pourtant pu s'attendre à une certaine surmortalité de la zone la plus polluée, au regard des graphiques de Cohen et al. (2007), qui comportent une augmentation du risque importante pour cette cause à mesure qu'augmente la concentration de $PM_{2.5}$. Cependant, c'est aussi la cause pour laquelle les intervalles d'incertitude sont les plus larges, ce qui permet peut-être d'expliquer l'absence de relation observée dans ce mémoire.

Pour les cancers du poumon, même si la pente de la courbe est assez faible dans les estimations de Cohen et al. (2017), l'incertitude est plus faible que pour les autres causes. Le résultat contre-intuitif que nous avons observé à Antananarivo, sur base des proportions de décès par cause, pose donc ici question, du fait de cette faible incertitude. Toutefois deux facteurs, déjà mentionnés plus tôt (la codification des cancers et celui de l'accès à certains soins) sont à prendre en compte pour relativiser ces résultats.

Les courbes de la Figure 11 estimées par Cohen et al. (2017) les plus intéressantes pour notre étude sont celles pour les maladies cérébro-vasculaires. L'augmentation du risque relatif de mortalité diminue quand l'âge augmente. Or, dans nos résultats, la significativité de la différence n'a été constatée que pour le groupe d'âge de 60 ans et plus. Chez les adultes (de 25 à 50 ans), pour lesquels l'étude de Cohen et al. (2007) montre la grande influence de la pollution de l'air sur l'augmentation du risque de mortalité, mais la différence de proportion n'a pas été significative dans notre étude. Par contre, la différence de moyenne d'âge de décès est significative et permet donc de montrer l'influence de cette cause, qui est plus présente chez des personnes plus jeunes dans la zone plus polluée, par rapport aux deux autres zones.

6. Limites de l'étude

Les limites des résultats et de l'étude en générales sont présentées dans ce chapitre.

Les résultats ne permettent pas de prouver une corrélation forte entre la pollution de l'air, telle que nous l'avons saisie dans les données et synthétisée par zone, et toutes les causes de mortalité identifiées aux différentes catégories d'âge. Il est évidemment toujours nécessaire de faire des concessions avec les données disponibles, étant donné qu'il est impossible de disposer de données couvrant de nombreuses années et reflétant précisément l'exposition au risque durant la durée de vie complète des habitants. Mais nous pouvons citer quelques limites importantes qu'il faudrait parvenir à contourner pour de prochaines études.

Premièrement, le caractère très local de l'analyse et la faiblesse des effectifs explique probablement le manque d'association. Un des biais possibles des données réside dans le fait que les décès sont associés au lieu d'habitation des personnes décédées. Or les personnes bougent dans une ville, par exemple pour travailler ou étudier sont donc soumises à d'autres concentrations de particules fines sur leur lieu de travail ou en milieu scolaire. De plus, les personnes n'habitent pas toute leur vie au même endroit, même si nous avons souligné qu'une proportion importante des habitants d'Antananarivo reste dans leur quartier de naissance.

Deuxièmement, une autre limite de l'étude tient au fait que les données de relevés de pollution par zone sont postérieures aux dates des décès constatés et ne portent donc pas sur la période de vie des habitants pris en compte. L'hypothèse prise en compte pour cette étude étant que les quartiers plus pollués maintenant l'étaient déjà auparavant.

Troisièmement, il faut rappeler que les données de pollution portent sur l'année 2017. Le relevé sur une année unique n'est pas suffisant car il peut ne pas correspondre aux niveaux de pollution des années précédentes, et il reste par ailleurs influencé par les conditions météorologiques des relevés. Il sera plus intéressant de compiler sur plusieurs années les données récoltées afin de lisser les particularités dues à une année précise. Etant donné que le projet de DHL est toujours en cours, de

nouvelles données sont encore collectées et permettent donc d'augmenter le nombre de données disponibles dans la base de données. Une mesure supplémentaire (intéressante) serait l'installation de capteurs additionnels permettant de récolter plus de données par jour et donc d'avoir un meilleur échantillonnage dans les différents quartiers. Pour la réalisation de ceci, il faudra avoir l'engagement d'autres partenaires publics ou privés afin d'installer de nouveaux capteurs. Ces deux avancées permettraient une amélioration dans le découpage des zones.

Quatrièmement, une limite importante rencontrée lors de cette étude était le fait qu'il n'existait pas de recensement de la population récent à Madagascar, le dernier datant de 1993. Afin d'approfondir cette étude il est serait utile d'utiliser les données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat III, qui a lieu du 18 mai au 10 juin 2018 (INSTAT Madagascar, 2018) et dont les données seront bientôt disponibles. Ces estimations rendront possible le calcul du taux de mortalité par âge, pour ainsi éviter la confusion possible introduite par les structures par âge des différents quartiers.

Finalement, des études supplémentaires permettant de mieux comprendre les enjeux de la pollution sont nécessaires, surtout dans le contexte africain et particulièrement à Madagascar. De plus, la surveillance de la pollution doit être augmentée, afin d'avoir des chiffres précis, ce que revendiquent déjà de nombreuses études dans le domaine (Sylla et al., 2017).

7. Pistes d'avancées possibles

Un certain nombre de pistes sont proposées dans ce chapitre, afin d'améliorer la qualité de l'air, le monitoring de celle-ci, ainsi que leur accès.

Diminution de la pollution

Afin d'améliorer la qualité de l'air, il est nécessaire d'augmenter et continuer à imposer des normes sur les gaz d'échappement des voitures, et de contrôler les feux de brousse dans les zones environnantes. Une menace pour la qualité de l'air est l'industrialisation (United Nations Human Settlements Programme, 2012), il sera donc important de bien suivre les projets industriels, afin qu'ils soient le moins nocifs possible pour la qualité de l'air. Une des forces de Madagascar est l'existence du Plan d'urbanisme directeur 2004 (ibid.), il permet de limiter l'urbanisation non contrôlée et permettra, s'il est bien respecté, de limiter les risques sanitaires de la pollution. L'aménagement et sécurisation du site d'Andralanitra (ibid.) où se trouve la décharge des ordures de la ville est nécessaire afin de ne pas avoir de prolifération de ce côté-là et ainsi éviter d'en faire une zone à haut risque ?

Monitoring

Pour assurer un bon suivi des mesures, un monitoring sur la qualité de l'air à Antananarivo est nécessaire, soit en favorisant les capteurs de type Aircasting, soit en installant des stations de mesures fixes à des endroits stratégiques. L'accès libre à ces données est important pour que les citoyens reprennent en main la question d'un air de qualité dans leur ville.

Accès libre des données dans le domaine public

L'importance de la mise à disposition au grand public des données semble fort importante dans l'étude de celles-ci. Le citoyen ne doit pas remplacer le personnel des instituts de statistiques nationaux, mais l'ouverture des données permet d'un côté le contrôle de ces statistiques et de l'autre l'ouverture de la recherche à d'autres chercheurs. L'utilisation de langages de programmation et d'analyse libres, tels que R, permet également une appropriation par tous des outils de statistiques élaborées. Afin de continuer dans cet esprit d'accès libre qui a permis l'élaboration de ce mémoire,

des parties des scripts R écrits pour ce mémoire seront publiés en accès libre sur internet et repris en annexe du présent mémoire.

Même si l'accès est théoriquement ouvert à tous, un travail de vulgarisation et de diffusion reste nécessaire. Une très grande majorité de citoyens, n'ont pas les compétences techniques pour traiter ces données ni ne s'intéressent assez pour aller les rechercher eux-mêmes.

8. Conclusion

La pollution de l'air, avec tout ce qu'elle induit, est un des enjeux majeurs dans l'épidémiologie actuelle. Induite par l'homme, elle pose donc en parallèle la question de son influence sur la santé, la question de la responsabilité des autorités et des individus dans l'émission de matières polluantes dans l'air. Cette responsabilité et ce fardeau collectif doit ainsi pouvoir être estimée pour chaque ville, afin que les citoyens puissent user de leurs droits démocratiques en connaissances de cause. Les décideurs politiques et les industriels doivent alors pouvoir se justifier auprès du grand public quant à leurs choix à cet égard. Bien que la technologie industrielle soit responsable de cette pollution, saura-t-elle aussi la contrer ? Les voitures ont des technologies toujours plus évoluées et des filtres ont été développés afin de réduire la pollution des usines. Mais-cela est-il suffisant ? Dans les pays d'Afrique qui récupèrent les anciens véhicules occidentaux, aux normes dépassées et où la combustion de charbon ou de bois à usage quotidien est encore habituelle et indispensable pour les familles, la question reste en suspens...

L'étude permet de valider certaines hypothèses comme le fait d'observer une association entre la pollution de l'air et les infections respiratoires inférieures chez les enfants et les maladies cérébro-vasculaires chez les personnes âgées. Cependant, pour la plupart des catégories d'âge et des causes étudiées, aucune association n'a été observée. L'analyse à une petite échelle comme celle utilisée ici nécessite certaines données non disponibles ou pas assez précises. Afin de pouvoir observer de manière plus précise des phénomènes comme ceux-ci le nombre et la qualité des données est un enjeu crucial.

L'opportunité des technologies de monitoring à bas coût peut permettre aux pays africains, ne disposant pas d'autant de moyens que leurs homologues occidentaux et asiatiques de mesurer leur taux de pollution et mettre des politiques en place avec des objectifs mesurables. L'opportunité de ce monitoring est donc grande, mais les personnes concernées saisiront-elles cette opportunité ? Sans que l'analyse sociale de ce travail soit la problématique posée, plusieurs soucis ont déjà été soulevés comme la difficulté d'accès aux soins de santé ou les problèmes d'inondation dans les quartiers de l'ouest d'Antananarivo. Il n'est pas du ressort celui-ci de déterminer les enjeux priori-

taire à prendre en main. Ce travail apporte une analyse récente sur la situation de la pollution de l'air et ces dangers pour la santé à Antananarivo. Il peut être la base pour appuyer des initiatives qui souhaitent aller dans le sens d'une meilleure qualité de l'air.

9. Bibliographie

Articles et livres

BEELEN, Rob et al. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. In : *The Lancet*. mars 2014. Vol. 383, n° 9919, p. 785-795. DOI 10.1016/S0140-6736(13)62158-3.

CIPOLLA, Maurizio, SORGENTI, Mario, GENTILE, Carlo et BISHARA, Marwa Maria, 2018. Air Pollution and Lung Diseases. In : CAPELLO, Fabio et GADDI, Antonio Vittorino (éd.), *Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. [Consulté le 1 août 2018]. ISBN 978-3-319-62730-4. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-62731-1>.

COHEN, Aaron J., BRAUER, Michael, BURNETT, Richard, ANDERSON, H. Ross, FROSTAD, Joseph, ESTEP, Kara, BALAKRISHNAN, Kalpana, BRUNEKREEF, Bert, DANDONA, Lalit et DANDONA, Rakhi, 2017. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. In : *The Lancet*. 2017. Vol. 389, n° 10082, p. 1907–1918.

DAY, Drew B., XIANG, Jianbang, MO, Jinhan, LI, Feng, CHUNG, Mingkei, GONG, Jicheng, WESCHLER, Charles J., OHMAN-STRICKLAND, Pamela A., SUNDELL, Jan, WENG, Wenguo, ZHANG, Yinping et ZHANG, Junfeng (Jim), 2017. Association of Ozone Exposure With Cardiorespiratory Pathophysiologic Mechanisms in Healthy Adults. In : *JAMA Internal Medicine*. 1 septembre 2017. Vol. 177, n° 9, p. 1344. DOI 10.1001/jamainternmed.2017.2842.

DI, Qian, DAI, Lingzhen, WANG, Yun, ZANOBBETTI, Antonella, CHOIRAT, Christine, SCHWARTZ, Joel D. et DOMINICI, Francesca, 2017. Association of Short-term Exposure to Air Pollution With Mortality in Older Adults. In : *JAMA*. 26 décembre 2017. Vol. 318, n° 24, p. 2446. DOI 10.1001/jama.2017.17923.

ESOAVELOMANDROSO, Faranirina V., 1985. Aménagement et occupation de l'espace dans la ville moyenne d'Antananarivo pendant la colonisation. (L'exemple du quartier d'Ankadifotsy.). In : . 1985. n° 99, p. 337-361.

FOURNET-GUÉRIN, Catherine, 2007. *Vivre à Tananarive: géographie du changement dans la capitale malgache*. Paris : Karthala. Hommes et sociétés. ISBN 978-2-84586-869-4. DT469.M38 T344 2007

GADDI, Antonio Vittorino, 2018. Air Pollution and Cardiovascular Diseases (Risk Factors and the Myocardial Cell Defence). In : CAPELLO, Fabio et GADDI, Antonio Vittorino (éd.), *Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases* [en ligne]. Cham : Springer

International Publishing. [Consulté le 1 août 2018]. ISBN 978-3-319-62730-4. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-62731-1>.

HANITRINIAINA, O., RANDRIAMANANDRAY, F. et RAHARISON, J., 2012. *Enquête sur les pauvres extrêmement pauvres de la capitale d'Antananarivo*. Madagascar. Département Project Evidence et Innovation Marie Stopes.

JERRETT, Michael, BURNETT, Richard T., MA, Renjun, POPE, C Arden, KREWSKI, Daniel, NEWBOLD, K Bruce, THURSTON, George, SHI, Yuanli, FINKELSTEIN, Norm, CALLE, Eugenia E. et THUN, Michael J., 2005. Spatial Analysis of Air Pollution and Mortality in Los Angeles: In : *Epidemiology*. novembre 2005. Vol. 16, n° 6, p. 727-736. DOI 10.1097/01.ede.0000181630.15826.7d.

KATANODA, Kota, SOBUE, Tomotaka, SATOH, Hiroshi, TAJIMA, Kazuo, SUZUKI, Takaichiro, NAKATSUKA, Haruo, TAKEZAKI, Toshiro, NAKAYAMA, Tomio, NITTA, Hiroshi, TANABE, Kiyoshi et TOMINAGA, Suketami, 2011. An Association Between Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Mortality From Lung Cancer and Respiratory Diseases in Japan. In : *Journal of Epidemiology*. 2011. Vol. 21, n° 2, p. 132-143. DOI 10.2188/jea.JE20100098.

LELIEVELD, J., EVANS, J. S., FNAIS, M., GIANNADAKI, D. et POZZER, A., 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. In : *Nature*. 16 septembre 2015. Vol. 525, n° 7569, p. 367-371. DOI 10.1038/nature15371.

PARIZOT, Isabelle, RAKOTOMANANA, Faly, RAZAFINDRAKOTO, Mireille, ROUBAUD, François et WACHSBERGER, Jean-Michel, 2005. Santé, inégalités et ruptures sociales à Antananarivo. In : . 2005. p. 78.

RAKOTONDRAMANANA, Hery Tiana, RANDRIAMANIVO, Lucienne Voahangilalao, ANDRIAMBOLOLONA, Raelina et RASOLOFONIRINA, Mamiseheno, 2003. Application de la fluorescence X à réflexion totale à l'étude des matières particulaires et des métaux lourds de la pollution de l'air dans la ville d'Antananarivo, Madagascar. In : 2268-3798 [en ligne]. 2003. Disponible à l'adresse : <http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=1990&format=print>.

RANDREMANANA, RV, MIGLIANI, R, RAKOTOMANGA, S et JEANNE, I, 2001. *Système d'Information Géographique et Santé : application à la ville d'Antananarivo*. S.I. Institut Pasteur de Madagascar,.

RANDRIAMANIVO, L V, ANDRIAMBOLOLONA, Raelina, RASOAZANANY, E O, ANDRIAMAHENINA, N N, RAVOSON, H et RAMAHERISON, H, 2009. Air Pollution in term of PM2.5 and PM2.5-10 in Andravoahangy area. In : . 2009. p. 5.

RASOAZANANY, E. O., ANDRIAMAHENINA, N. N., RAVOSON, H. N., ANDRIAMBOLOLONA, Raelina, RANDRIAMANIVO, L. V., RAMAHERISON, H., AHMED, H. et HARINOELY,

M., 2012. Air pollution studies in terms of PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, PM₁₀, lead and black carbon in urban areas of Antananarivo-Madagascar. In : *arXiv preprint arXiv:1204.1498* [en ligne]. 2012. [Consulté le 10 août 2017]. Disponible à l'adresse : <https://arxiv.org/abs/1204.1498>.

SYLLA, Fatou K., FAYE, Adama, FALL, Mamadou et TAL-DIA, Anta, 2017. Air Pollution Related to Traffic and Chronic Respiratory Diseases (Asthma and COPD) in Africa. In : *Health*. 2017. Vol. 09, n° 10, p. 1378-1389. DOI 10.4236/health.2017.910101.

TOSITTI, Laura, 2018. Physical and Chemical Properties of Airborne Particulate Matter. In : CAPELLO, Fabio et GADDI, Antonio Vittorino (éd.), *Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. [Consulté le 1 août 2018]. ISBN 978-3-319-62730-4. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-62731-1>.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, 2012. *Madagascar: profil urbain de Antananarivo* [en ligne]. Nairobi, Kenya : ONU-HABITAT. [Consulté le 19 juin 2018]. Disponible à l'adresse : <http://books.google.com/books?id=nu-7D6489zUC>.

WACHSBERGER, Jean-Michel, 2009. Les quartiers pauvres à Antananarivo: Trappe à pauvreté ou support des individus ? In : *Autrepart*. 2009. Vol. 51, n° 3, p. 117. DOI 10.3917/autr.051.0117.

Rapports et textes de loi

ASSEMBLÉE NATIONALE, 2015. Loi n°2015-003 portant Charte de l'Environnement Malagasy actualisée. 2015. S.l. : s.n.

INSTAT MADAGASCAR, 2018. Pourquoi un RGPH3 pour Madagascar ? – INSTAT Madagascar. In : [en ligne]. 2018. [Consulté le 4 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.instat.mg/rgph-3-madagascar/pourquoi-rgph-3-madagascar/>.

INSTITUTE FOR HEALTH METRICS AND EVALUATION (IHME), 2016. GBD Compare Data Visualization [en ligne]. Seattle, WA. IHME, University of Washington. [Consulté le 9 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>.

KREWSKI, Daniel, JERRETT, Michael, BURNETT, Richard T., MA, Renjun, HUGHES, Edward, SHI, Yuanli, TURNER, Michelle C., POPE III, C. Arden, THURSTON, George, CALLE, Eugenia E. et THUN, Michael J., 2009. 140 : HEI Research Report 140. S.l. Health Effects Institute,. HEI Research Report.

MADAGASCAR, 2015. Plan national de développement : Madagascar (PND) 2015-2019. S.l.

MADAGASCAR SERVICES, 2017. Comparatif Organismes de Service Médical Inter-entreprises à Madagascar. In : Actualités administratives à Madagascar [en ligne]. 4 avril 2017. [Consulté le 14 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.madagascar-services.com/blog/post/2017/04/04/comparatif-smie-madagascar>.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES FORÊTS, 2012. Rapport sur l'Etat de l'Environnement à Madagascar 2012. Chapitre 8 : Environnement Urbain. S.I.

RANDREMANANA, RV, MIGLIANI, R, RAKOTOMANGA, S et JEANNE, I, 2001. Système d'Information Géographique et

Santé : application à la ville d'Antananarivo. S.I. Institut Pasteur de Madagascar,.

UNEP, 2017. Projet de résolution sur la prévention et la réduction de la pollution atmosphérique pour améliorer la qualité de l'air à l'échelle mondiale. S.I. Assemblée des Nations Unies pour l'environnement du Programme des Nations Unies pour l'environnement.

UNESCO, Centre du patrimoine, 2016. La Haute Ville d'Antananarivo - UNESCO World Heritage Centre. In : UNESCO Centre du patrimoine mondial [en ligne]. 2016. [Consulté le 15 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : <https://whc.unesco.org/fr/listesindicatives/6078/>.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, 2012. Madagascar: profil urbain de Antananarivo [en ligne]. Nairobi, Kenya : ONU-HABITAT. [Consulté le 19 juin 2018]. Disponible à l'adresse : <http://books.google.com/books?id=nu-7D6489zUC>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. S.I.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018. Ambient (outdoor) air quality and health. In : World Health Organization [en ligne]. 2018. [Consulté le 12 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : [http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

10. Packages R utilisés dans le cadre de ce mémoire

Liste: dplyr, car, sp, RColorBrewer, plyr, dplyr, tidyverse, maptools, gtools, rgdal, sp, rgeos, foreign, FactoMineR, psych, pvclust, proxy, jsonlite, curl

David Meyer and Christian Buchta (2016). proxy: Distance and Similarity Measures. R package version 0.4-16. <https://CRAN.R-project.org/package=proxy>

Erich Neuwirth (2014). RColorBrewer: ColorBrewer Palettes. R package version 1.1-2. <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>

Gregory R. Warnes, Ben Bolker and Thomas Lumley (2015). gtools: Various R Programming Tools. R package version 3.5.0. <https://CRAN.R-project.org/package=gtools>

Hadley Wickham (2011). The Split-Apply-Combine Strategy for Data Analysis. Journal of Statistical Software, 40(1), 1-29. URL <http://www.jstatsoft.org/v40/i01/>

Hadley Wickham (2017). tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'. R package version 1.2.1. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse>

Hadley Wickham, Romain Francois, Lionel Henry and Kirill Müller (2017). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.7.4. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Jeroen Ooms (2014). The jsonlite Package: A Practical and Consistent Mapping Between JSON Data and R Objects. arXiv:1403.2805 [stat.CO] URL <https://arxiv.org/abs/1403.2805>.

Jeroen Ooms (2018). curl: A Modern and Flexible Web Client for R. R package version 3.2 <https://CRAN.R-project.org/package=curl>

John Fox and Sanford Weisberg (2011). An {R} Companion to Applied Regression, Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>

Microsoft Corporation and Steve Weston (2017). doParallel: Foreach Parallel Adaptor for the 'parallel' Package. R package version 1.0.11. <https://CRAN.R-project.org/package=doParallel>

Microsoft Corporation and Steve Weston (2017). foreach: Provides Foreach Looping Construct for R. R package version 1.4.4. <https://CRAN.R-project.org/package=foreach>

Pebesma, E.J., R.S. Bivand, 2005. Classes and methods for spatial data in R. R News 5 (2), <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>

Pebesma, E.J., R.S. Bivand, 2005. Classes and methods for spatial data in R. R News 5 (2), <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>

R Core Team (2016). foreign: Read Data Stored by Minitab, S, SAS, SPSS, Stata, Systat, Weka, dBase, R package version 0.8-67. <https://CRAN.R-project.org/package=foreign>

Revelle, W. (2016) psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, <https://CRAN.R-project.org/package=psych> Version = 1.6.9.

Roger Bivand and Colin Rundel (2017). rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS'). R package version 0.3-26. <https://CRAN.R-project.org/package=rgeos>

Roger Bivand and Nicholas Lewin-Koh (2017). maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects. R package version 0.9-2. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>

Roger Bivand, Tim Keitt and Barry Rowlingson (2018). rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. R package version 1.2-18. <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>

Roger S. Bivand, Edzer Pebesma, Virgilio Gomez-Rubio, 2013. Applied spatial data analysis with R, Second edition. Springer, NY. <http://www.asdar-book.org/>

Ryota Suzuki and Hidetoshi Shimodaira (2015). pvclust: Hierarchical Clustering with P-Values via Multiscale Bootstrap Resampling. R package version 2.0-0. <https://CRAN.R-project.org/package=pvclust>

Sebastien Le, Julie Josse, Francois Husson (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1), 1-18. 10.18637/jss.v025.i01

11. Annexes

Annexe 1

```
#Assemblage de la grande base de données récupérée sur par le API de
Aircasting.org

#set up-----
library(jsonlite)
library(foreach)
library(doParallel)

data_flat<-
fromJSON("http://aircasting.org/api/sessions.json?page=0&page_size=100
00&q[measurements]=true|q[year_from]=2011|q[year_to]=2019&q[location]=
Tananarive&q[distance]=50&q[sensor_name]=AirBeam-
PM&q[unit_symbol]=?g/m?", flatten = TRUE)
#Ici les paramètres pour Antanarivo et des années de départ avant et
après le début de la récolte de données
#description des paramètres disponibles
https://github.com/HabitatMap/AirCasting/blob/master/doc/api.md

#méthode parallèle-----
#setup parallèle pour utiliser plusieurs processeurs
cores=detectCores()
cl <- makeCluster(cores[1]-1) #Pour ne pas surcharger votre ordinateur
registerDoParallel(cl)

finalFrame <-
reach(i=1:length(data_flat$id), .combine=rbind, .packages='jsonlite')
%do% { #Pour être sûr que le code fonctionne chez vous, remplacez
length(data_flat$id) par un petit nombre, les erreurs au sein de fo-
reach ne s'affiche qu'après toutes les opérations effectuées
  x <- data_flat$id[i]
  url <- paste("http://aircasting.org/api/sessions/",x,".json",sep="")
  temp <- fromJSON(url)
  session <- as.vector(rep(x, length(temp$streams$`AirBeam-
PM`$measurements[,1])))
  VarFrame <- data.frame(temp$streams$`AirBeam-
PM`$measurements,session)
  VarFrame
#Equivalent à finalMatrix = cbind(finalFrame, tempFrame)
}
save(finalFrame, file = "finalFrame.Rda")

# Méthode avec une loop -----
# Fais la même chose, mais beaucoup plus lentement
for(i in 1:length(data_flat$id)){ #Pour être sûr que le code fonc-
tionne chez vous, remplacez length(data_flat$id) par un petit nombre,
les erreurs au sein de for ne s'affiche qu'après toutes les opérations
effectuées
  x <- data_flat$id[i]
  url <- paste("http://aircasting.org/api/sessions/",x,".json",sep="")
  temp <- fromJSON(url)
  session <- as.vector(rep(x, length(temp$streams$`AirBeam-
PM`$measurements[,1])))
  VarFrame <- data.frame(temp$streams$`AirBeam-
PM`$measurements,session)
  if (i==1) {
    MegaFrame<-VarFrame
  } else {
```

```

    MegaFrame<-rbind(MegaFrame,VarFrame)
  }
}

```

Annexe 2

```

#Création des moyennes par quartier
library(dplyr)
library(tidyverse);

#P_Code est le code de quartier
#MegaFrame est la base de données avec les mesures de pollution de
l'air
#création d'une moyenne de session par quartier
MeanFrame2 <- MegaFrame %>%
  group_by(P_CODE, session) %>%
  summarise(mean.value = mean(value))
#MeanFrame2 est un dataframe avec pour chaque combinaison de P_CODE et
session existant une moyenne de PM2.5

#moyenne des moyennes des sessions par quartier
summary(MeanFrame2$mean.value)
MeanFrame3<- MeanFrame2 %>%
  group_by(P_CODE) %>%
  summarise(mean2.value = mean(mean.value))
  #MeanFrame3 est un dataframe avec le P_CODE et sa moyenne de PM2.5

```