

Étude simultanée du trafic et des concentrations en particules fines (PM_{2,5}) en période de confinement national

Auteur : Muller, Jérémy

Promoteur(s) : Romain, Anne-Claude

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en surveillance de l'environnement

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10134>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement
Année académique 2019 – 2020

ÉTUDE SIMULTANÉE DU TRAFIC ET DES CONCENTRATIONS EN PARTICULES FINES (PM_{2,5}) EN PÉRIODE DE CONFINEMENT NATIONAL



Source : <https://www.pinterest.fr/pin/212443307410256328/>

Mémoire présenté par **Jérémy MULLER**
en vue de l'obtention du grade de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, à finalité
spécialisée en Monitoring environnemental

Rédigé sous la direction de **Claudia FALZONE** et **Anne-Claude ROMAIN**
Comité de lecture : **Fabian LENARTZ** et **Martyna KUSKE**

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

* L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège.

Le présent document n'engage que son auteur

Auteur du présent document : Jérémy Muller, jeremy.muller@skynet.be

Remerciements

La partie « Remerciements » est généralement très cadrée et organisée selon un canevas officiel et solennel mettant en doute la véracité de ses écrits.

J'ai donc décidé de partager cette section en deux. La première consiste à remercier l'ensemble des personnes m'ayant permis de réaliser ce mémoire et la seconde, qui me semble toute aussi importante, consiste à intégrer toutes les personnes qui m'ont permis d'arriver aussi loin dans mon parcours scolaire.

Afin de débiter cette première partie, je souhaiterais adresser de vifs remerciements à Madame Claudia FALZONE, promotrice de ce mémoire, qui s'est montrée toujours disponible et attentive à mon égard, avec qui de nombreuses discussions ont permis de faire émerger de bonnes idées et de précieux conseils et enfin, qui m'a accompagné tout au long de cette rédaction.

Je voudrais remercier aussi chaleureusement Madame Anne-Claude Romain, co-promotrice et professeure principale de la finalité spécialisée en Monitoring environnemental, qui m'a dispensé des cours de qualité et diversifiés, ainsi que pour ses précieux conseils sur de nombreuses thématiques liées à ce mémoire.

J'aimerais remercier grandement l'ISSEP et sa Cellule Qualité de l'air, et plus précisément Monsieur Nicolas FERNEMONT, Madame Marie DURY, Monsieur Guy GERARD et Monsieur Fabian LENARTZ, qui m'ont permis d'obtenir des données liées au trafic routier autour de l'Institut Notre Dame d'Arlon à l'aide de trois capteurs radars dont toute la logistique a été assurée par leurs soins.

Je souhaiterais remercier Madame Annick NOIRHOMME, directrice de la partie secondaire de l'Institut Notre-Dame d'Arlon et Monsieur Philippe PONCE, directeur de la section fondamentale de l'Institut Notre-Dame d'Arlon pour leur collaboration et leur autorisation pour le placement des différents capteurs PM aux entrées de leur établissement.

Je voudrais remercier Monsieur Thibaut VINCENT, conseiller en Mobilité de la ville d'Arlon, qui a permis la pose des capteurs radars et qui m'a informé de l'état de l'offre en transport en commun durant la période de confinement aux abords de l'Institut Notre-Dame d'Arlon.

Dans la seconde partie, je voudrais remercier chaleureusement mes parents qui ont assumé les frais associés à ma scolarisation et qui, malgré une série d'échecs lors de mon arrivée dans l'enseignement supérieur, n'ont jamais douté de mes compétences et m'ont soutenu en permanence tant dans les périodes d'examens qu'au quotidien.

Je souhaiterais aussi remercier mon frère qui sans le savoir, a été un moteur permanent dans le travail que j'ai fourni et les défis que j'ai relevés. Frère et meilleur ami, il aura toujours été un compagnon bénéfique et indispensable depuis toujours.

J'aimerais également remercier la Haute Ecole Robert Schuman et plus précisément, tous les représentants de la catégorie technique qui m'ont permis de réaliser un bachelier en Chimie à finalité Environnement en m'accordant leur confiance malgré mon statut d'étudiant non finançable au sens des décrets relatifs à la finançabilité des étudiants de l'enseignement supérieur.

Je remercie l'Université de Liège et tous les professeurs du campus d'Arlon qui m'ont permis de suivre cette formation et qui m'ont encadré au cours de celle-ci.

Enfin, à titre de réflexion et de pensées, dans un monde intégralement connecté dans lequel les liens n'ont jamais été aussi menacés, dans un monde de réseaux dans lequel l'être humain n'est plus qu'un numéro, dans des formations à ambition sociologique dans lesquelles les individus sont de plus en plus égocentriques, dans un monde dans lequel l'être humain a oublié ce qu'était « être humain », je souhaiterais remercier chaque personne appliquant la citation de Sénèque comme dicton de vie :

« Tant que nous sommes parmi les hommes, pratiquons l'humanité. »

Sénèque

Résumé

L'année 2020 a été marquée par une série de mesures de restrictions suite à la pandémie de covid-19 caractérisant une période de réduction de l'activité humaine. Cette période unique est une chance inouïe pour l'étude de la qualité de l'air. En effet, la pollution de l'air est souvent associée à l'homme et cette période a permis la mesure de polluants atmosphériques en condition d'activités humaines fortement réduites.

L'étude a été effectuée autour d'un établissement scolaire non loin du centre d'une petite ville entourée de 3 rues présentant des caractéristiques morphologiques intéressantes. Les mesures sont effectuées aux entrées de l'école.

Dans le cadre de cette étude, le polluant d'intérêt correspond à la fraction des $PM_{2.5}$. Celui-ci a été mesuré à l'aide d'instruments conçus par le SAM-ULiège composé de trois capteurs low-cost de la société Honeywell qui fonctionnent sur principe de diffraction optique. Les concentrations mesurées à Arlon ont été comparées à la concentration mesurée à Habay-la-Vieille, une station de référence de type rurale dans le réseau de mesure Wallon.

L'intensité du trafic a été mesurée au cours des périodes caractérisant le confinement décrété par les autorités gouvernementales à l'aide de compteurs de véhicules placés par l'ISSEP dans chaque rue autour de l'école.

Les données obtenues ont été mesurées à l'aide de Rstudio. Les concentrations en $PM_{2.5}$ ont été mises en relation avec l'intensité de l'activité humaine définie sur base de l'intensité de trafic mesurée. Il ressort de cette étude que les concentrations en $PM_{2.5}$ ne sont pas significativement modifiées par un changement significatif de l'intensité de trafic.

Tables des matières

| | | |
|----------|---|----|
| I. | Mise en contexte / Préambule | 10 |
| II. | Introduction et objectifs..... | 16 |
| III. | Les particules..... | 17 |
| III.1. | Définition et généralités | 17 |
| III.2. | Caractéristiques..... | 17 |
| III.3. | Mode de formation..... | 18 |
| III.4. | Temps de vie des particules | 19 |
| III.5. | Sources..... | 20 |
| III.6. | Dispersion des particules en milieu urbain | 21 |
| III.6.1. | Les secteurs producteurs de particules | 21 |
| III.6.2. | Phénomène de canyon..... | 22 |
| III.6.3. | Classification et types de rues canyons | 22 |
| III.6.4. | Conditions de vents | 23 |
| III.6.5. | Effets des rues canyon | 24 |
| III.6.6. | Modèles en Belgique et difficultés de mise en œuvre | 24 |
| III.7. | Législation..... | 25 |
| III.8. | Techniques de mesure | 26 |
| III.8.1. | La gravimétrie | 26 |
| III.8.2. | Moniteur Grimm EDM 180 | 26 |
| III.8.3. | L'analyseur de particules de type BAM | 27 |
| III.8.4. | L'analyseur de particules de type TEOM-FDMS | 27 |
| III.8.5. | Mesure du contenu en carbone dans les aérosols..... | 27 |
| III.8.6. | Les micro-capteurs low-cost..... | 28 |
| III.9. | Santé et environnement | 29 |
| III.9.1. | Santé | 29 |
| III.9.2. | Environnement..... | 30 |
| IV. | La qualité de l'air pendant le confinement..... | 31 |
| V. | Site étudié..... | 33 |
| V.1. | Description..... | 33 |
| V.2. | Climat..... | 33 |
| V.3. | Localisation | 35 |
| V.4. | Topographie..... | 37 |
| V.5. | Occupation du sol | 37 |
| V.6. | Géométrie urbaine – Les rues canyon | 39 |
| VI. | Matériel et méthodes | 40 |
| VI.1. | Matériel | 40 |
| VI.1.1. | Instruments SAM – 3 capteurs PM2,5..... | 40 |
| VI.1.2. | Capteurs Honeywell HPM115S0..... | 42 |

| | | |
|---------|---|----|
| VI.1.3. | Station météo..... | 43 |
| VI.1.4. | Capteurs de référence ULiège | 44 |
| VI.1.5. | Compteurs Radar ISSeP | 44 |
| VI.1.6. | RStudio | 46 |
| VI.2. | Méthodes | 47 |
| VI.2.1. | Positionnement des capteurs | 47 |
| VI.2.2. | Période de mesures..... | 48 |
| VI.2.3. | Correction des heures et application d'une même timezone | 48 |
| VI.2.4. | Inter-comparaison..... | 49 |
| VI.2.5. | Sélection des données des capteurs au sein d'un même instrument | 49 |
| VI.2.6. | Test de normalité | 51 |
| VI.2.7. | Test statistique utilisé | 52 |
| VII. | Résultats et analyses | 54 |
| VII.1. | Introduction | 54 |
| VII.2. | Inter-comparaison..... | 54 |
| VII.3. | Comparaison d'une station de référence durant la période de confinement et en période « traditionnelle » | 56 |
| VII.4. | Comparaison Habay 2020 et Arlon 2020 | 60 |
| VII.5. | Analyse du trafic de 2020 | 63 |
| VII.6. | Comparaison du trafic 2019 et du trafic 2020 | 71 |
| VII.7. | Analyse des concentrations en PM _{2,5} des 3 rues en fonction de la période liée à la pandémie de covid-19 | 75 |
| VII.8. | Etude de la corrélation des concentrations en PM _{2,5} avec le trafic au cours de l'année 2020 | 80 |
| VIII. | Conclusions | 82 |
| IX. | Annexes..... | 89 |

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| FIGURE 1 - LIGNE DU TEMPS CARACTERISANT LES DIFFERENTES PERIODES POUR LESQUELLES LES AUTORITES GOUVERNEMENTALES ONT FORMULE DES RESTRICTIONS PAR RAPPORT AUX ACTIVITES DES CITOYENS.. | 15 |
| FIGURE 2 - FRACTIONS DES PARTICULES EN FONCTION DE LA TAILLE DE CELLES-CI..... | 17 |
| FIGURE 3 – COMPOSITION CHIMIQUE D'UNE PARTICULE..... | 18 |
| FIGURE 4 - TAILLE DES PARTICULES..... | 18 |
| FIGURE 5 - MODES DE FORMATION DES PARTICULES SECONDAIRES, TAILLE DES FRACTIONS DE PARTICULES ET TEMPS DE RESIDENCE | 19 |
| FIGURE 6 - TRANSPORT VERTICAL DANS L'ATMOSPHERE ET TEMPS DE VIE DES PARTICULES..... | 20 |
| FIGURE 7 - EMISSIONS DES $PM_{2,5}$ EN FONCTION DES SECTEURS..... | 21 |
| FIGURE 8 - A) REPRESENTATION D'UNE RUE CANYON B) COURANTS DE DISPERSION D'UN POLLUANT DANS UNE RUE CANYON DE TYPE « REGULAR »..... | 22 |
| FIGURE 9 - REGIMES POTENTIELS OBSERVABLES LORSQUE LES VENTS SYNOPTIQUES SONT PERPENDICULAIRES A LA RUE CANYON | 24 |
| FIGURE 10 - A) ASPECT EXTERIEUR DE L'INSTRUMENT TYPE GRIMM EDM 180 B) PRINCIPE DE MESURE DE L'APPAREIL GRIMM EDM 180 | 26 |
| FIGURE 11 - SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN MICRO-CAPEUR DE PARTICULES..... | 28 |
| FIGURE 12 - CONCENTRATIONS EN PM_{10} ET $PM_{2,5}$ POUR LES DIFFERENTES STATIONS DE BRUXELLES DANS LE CADRE DE L'ETUDE SUR L'IMPACT DE LA QUALITE DE L'AIR EN PERIODE DE CONFINEMENT | 32 |
| FIGURE 13 – DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE CARACTERISANT ARLON OBTENU A L'AIDE DES DONNEES HISTORIQUES DE 1981 A 2010. | 33 |
| FIGURE 14 - A) ROSE DES VENTS CARACTERISANT SAINT-HUBERT OBTENUE A L'AIDE DE DONNEES HISTORIQUES DE 1981 A 2010. B) ROSE DES VENTS OBTENUE A L'AIDE DU MODELE METEOROLOGIQUE DE METEOBLUE. | 34 |
| FIGURE 15 - ROSE DES VENTS REALISEES A L'AIDE DES DONNEES DE LA STATION METEO D'ARLON..... | 35 |
| FIGURE 16 - CONFIGURATION DU SITE D'ETUDE. | 36 |
| FIGURE 17 - RELIEF DU SITE D'ETUDE. | 37 |
| FIGURE 18 - OCCUPATION DU SOL DANS LA REGION D'ARLON ET LEGENDE DES COUCHES..... | 38 |
| FIGURE 19 - PHOTO DES 3 OUÏES D'ASPIRATION DE L'INSTRUMENT..... | 40 |
| FIGURE 20 - INTERIEUR DES INSTRUMENTS.. | 40 |
| FIGURE 21 - ASPECT EXTERIEUR DES CAPTEURS (GAUCHE) ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR (DROITE). | 42 |
| FIGURE 22 - CARTE DE LOCALISATION DES INSTRUMENTS DU SAM-ULIEGE ET DES COMPTEURS RADARS TMS-SA..... | 45 |
| FIGURE 23 - PHOTOGRAPHIES DU POSITIONNEMENT DES COMPTEURS RADAR TMS-SA..... | 45 |
| FIGURE 24 - PHOTOGRAPHIE DE LA POSITION DES CAPTEURS DANS LES 3 AUTOUR DE L'INDA | 47 |
| FIGURE 25 - EXEMPLES DE PICS ENLEVES PAR LE PROCESSUS DE SELECTION DES PICS..... | 50 |
| FIGURE 26 – ECHANTILLON FICTIF CREE A PARTIR D'UNE LOI NORMALE A) DIAGRAMME QUANTILE-QUANTILE DE L'ECHANTILLON B) HISTOGRAMME DE DISTRIBUTION DE L'ECHANTILLON | 51 |
| FIGURE 27 - GRAPHIQUE DE CORRELATION DE SPEARMAN ENTRE LES DIFFERENTS CAPTEURS CONSTITUANT LES INSTRUMENTS (ETUDE D'INTER-COMPARAISON)..... | 55 |
| FIGURE 28 - GRAPHIQUE TEMPOREL DES CONCENTRATIONS MOYENNEES PAR SEMAINE EN $PM_{2,5}$ MEASUREES A LA STATION D'HABAY POUR LA PERIODE DU 1ER MARS AU 30 JUIN DES ANNEES 2015 A 2020. LES CONCENTRATIONS SONT EXPRIMEES EN $\mu G/M^3$. SOURCE : IRCÉLINE | 57 |
| FIGURE 29 - BOXPLOT DES CONCENTRATIONS HORAIRES EN $PM_{2,5}$ MEASUREES A LA STATION D'HABAY POUR LA PERIODE DU 1ER MARS AU 30 JUIN DES ANNEES 2015 A 2020. LES CONCENTRATIONS SONT EXPRIMEES EN $\mu G/M^3$. SOURCE : IRCÉLINE | 58 |
| FIGURE 30 - DISTRIBUTION DES DONNEES HORAIRES EN $PM_{2,5}$ MEASUREES A LA STATION D'HABAY POUR LA PERIODE DU 1ER MARS AU 30 JUIN DES ANNEES 2015 A 2020. SOURCE : IRCÉLINE | 59 |
| FIGURE 31 - GRAPHIQUE DE CORRELATION DE SPEARMAN ENTRE LES CONCENTRATIONS HORAIRES EN $PM_{2,5}$ MEASUREES EN $\mu G/M^3$ A LA STATION D'HABAY ET DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA POUR LA PERIODE D'ETUDE AU COURS DE L'ANNEE 2020. | 61 |
| FIGURE 32 - BOXPLOT DES CONCENTRATIONS HORAIRES EN $PM_{2,5}$ MEASUREES EN $\mu G/M^3$ A LA STATION D'HABAY ET DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA POUR LA PERIODE D'ETUDE AU COURS DE L'ANNEE 2020. | 61 |
| FIGURE 33 - DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS HORAIRES EN $PM_{2,5}$ MEASUREES EN $\mu G/M^3$ A LA STATION D'HABAY ET DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA POUR LA PERIODE D'ETUDE AU COURS DE L'ANNEE 2020. | 62 |

| | |
|---|----|
| FIGURE 34 - GRAPHIQUE TEMPOREL DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE DECOUPEE DANS LE SENS VERTICAL EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VEHICULES PAR JOUR. | 64 |
| FIGURE 35 - GRAPHIQUE TEMPOREL DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LA RUE DU CASINO AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE DECOUPEE DANS LE SENS VERTICAL EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VEHICULES PAR JOUR. | 64 |
| FIGURE 36 – (EN HAUT) BOXPLOT DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. (EN BAS) BOXPLOT DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LA RUE DU CASINO AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VEHICULES PAR JOUR. | 65 |
| FIGURE 37 - BOXPLOT DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LA RUE JOSEPH NETZER ET L'AVENUE VICTOR TESCH AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. BOXPLOT EN FORMAT WRAP EN FONCTION DES RUES. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VEHICULES PAR JOUR. | 66 |
| FIGURE 38 - BOXPLOT DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LA RUE DU CASINO AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VEHICULES PAR JOUR. | 66 |
| FIGURE 39 - DISTRIBUTION DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. | 67 |
| FIGURE 40 - DISTRIBUTION DES DONNEES TRAFIC MESUREES SELON LES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020 DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA. | 67 |
| FIGURE 41 - CAPTURE D'ECRAN DE LA CONSOLE DU LOGICIEL RSTUDIO INDIQUANT UNE ERREUR DE CALCUL DE LA P-VALUE EXACTE EN PRESENCE D'EX-AEQUOS DANS LES RANGS POUR LE TEST DE WILCOXON. | 68 |
| FIGURE 42 - REPRESENTATION SOUS FORME D'AGENDA DE LA PERIODE COMMUNE POUR LES DONNEES TRAFIC DES ANNEES 2019 ET 2020. | 71 |
| FIGURE 43 - GRAPHIQUE TEMPOREL DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE COMMUNE POUR L'ANNEE 2019 ET L'ANNEE 2020. | 72 |
| FIGURE 44 – BOXPLOT DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE COMMUNE POUR L'ANNEE 2019 ET L'ANNEE 2020. | 73 |
| FIGURE 45 - DISTRIBUTION DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE COMMUNE POUR L'ANNEE 2019 ET L'ANNEE 2020. | 73 |
| FIGURE 46 - (EN HAUT) BOXPLOT DES CONCENTRATIONS EN $PM_{2,5}$ MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. (EN BAS) BOXPLOT ZOOM DES CONCENTRATIONS MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. LES CONCENTRATIONS S'EXPRIMENT EN $\mu G/M^3$. | 76 |
| FIGURE 47 - (EN HAUT) BOXPLOT DES CONCENTRATIONS $PM_{2,5}$ MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. BOXPLOT EN FORMAT WRAP EN FONCTION DES RUES. (EN BAS) BOXPLOT ZOOM DES CONCENTRATIONS MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. LES CONCENTRATIONS S'EXPRIMENT EN $\mu G/M^3$. | 77 |
| FIGURE 48 - DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS EN $PM_{2,5}$ MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA EN FONCTION DES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020. | 78 |
| FIGURE 49 - DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS EN $PM_{2,5}$ MESUREES SELON LES PHASES LIEES AU CONFINEMENT POUR L'ANNEE 2020 CORRESPONDANT AUX RUES AUTOUR DE L'INDA. | 78 |
| FIGURE 50 - GRAPHIQUE DE CORRELATION DE SPEARMAN OBTENU EN METTANT EN RELATION LES JEUX DE DONNEES CORRESPONDANT AUX DONNEES TRAFIC ET AUX CONCENTRATIONS EN $PM_{2,5}$ DES RUES AUTOUR DE L'INDA. | 81 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| TABEAU 1 - SOURCES NATURELLES ET ANTHROPIQUES DES PARTICULES PRIMAIRES | 20 |
| TABEAU 2 - SOURCES DES PARTICULES SECONDAIRES | 21 |
| TABEAU 3 - VALEURS LIMITEES DE LA DIRECTIVE 2008/50/CE ET RECOMMANDATIONS DE L'OMS POUR LES PM ₁₀ ET LES PM _{2,5} | 25 |
| TABEAU 4 - TABLEAU DE FREQUENCE DES VENTS EN FONCTION DE LA DIRECTION DES VENTS ET VITESSE MOYENNE DU VENT EN FONCTION DE LA DIRECTION..... | 34 |
| TABEAU 5 - TABLEAU REPRENANT LE VITESSE MOYENNE ET LA DIRECTION LA PLUS FREQUENTE DU VENT MENSUEL MOYEN. | 34 |
| TABEAU 6 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS HONEYWELL..... | 42 |
| TABEAU 7 - INFORMATIONS RELATIVES AU PLACEMENT DES COMPTEURS DE VEHICULE TYPE TMS-SA. | 45 |
| TABEAU 8 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE CHAQUE CAPTEUR (CONCENTRATIONS EN µG/M ³) | 54 |
| TABEAU 9 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONCENTRATIONS HORAIRES EN PM _{2,5} MESUREES A LA STATION POUR LA PERIODE DU 1ER MARS AU 30 JUIN DES ANNEES 2015 A 2020. CONCENTRATIONS EN µG/M ³ | 56 |
| TABEAU 10 - TABLEAU DES P-VALUES RESULTANTES DU TEST DE STATISTIQUE NON-PARAMETRIQUE DE WILCOXON POUR LES CONCENTRATIONS EN PM _{2,5} MESUREES A LA STATION D'HABAY POUR LA PERIODE DU 1ER MARS AU 30 JUIN DES ANNEES 2015 A 2020. | 59 |
| TABEAU 11 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONCENTRATIONS EN PM _{2,5} MESUREES A LA STATION D'HABAY ET DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE POUR L'ANNEE 2020. CONCENTRATIONS EN µG/M ³ | 60 |
| TABEAU 12 - TABLEAU DES P-VALUES RESULTANTES DU TEST DE STATISTIQUE NON-PARAMETRIQUE DE WILCOXON POUR LES CONCENTRATIONS HORAIRES EN PM _{2,5} MESUREES A LA STATION D'HABAY ET DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA POUR LA PERIODE D'ETUDE AU COURS DE L'ANNEE 2020..... | 62 |
| TABEAU 13 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE (DE LA PERIODE CONF1 A LA PERIODE P1B) POUR L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VOITURES PAR JOUR..... | 63 |
| TABEAU 14 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE (DE LA PERIODE P2 A LA PERIODE P4) POUR L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VEHICULES PAR JOUR. | 63 |
| TABEAU 15 – TABLEAU INDIQUANT LES PAIRES DE VALEURS DE LA VARIABLE QUALITATIVE COMBINEE POUR LESQUELLES LA P-VALUE EST SUPERIEURE A 0.05 LORSQUE LA PERIODE EST IDENTIQUE. | 68 |
| TABEAU 16 - TABLEAU INDIQUANT LES PAIRES DE VALEURS DE LA VARIABLE QUALITATIVE COMBINEE POUR LESQUELLES LA P-VALUE EST SUPERIEURE A 0.05 LORSQUE LA RUE EST IDENTIQUE. | 69 |
| TABEAU 17 - TABLEAU INDIQUANT LES PAIRES DE VALEURS DE LA VARIABLE QUALITATIVE COMBINEE POUR LESQUELLES LA P-VALUE EST SUPERIEURE A 0.05 LORSQUE LA RUE ET LA PERIODE SONT DIFFERENTES. | 70 |
| TABEAU 18 - TABLEAU DETAILLE DES JOURS FERIES, DES JOURS NORMAUX ET DES JOURS DE WEEK-END CORRESPONDANT A LA PERIODE COMMUNE POUR LES ANNEES 2019 ET 2020..... | 71 |
| TABEAU 19 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE COMMUNE POUR L'ANNEE 2019 ET L'ANNEE 2020. LES DONNEES S'EXPRIMENT EN NOMBRE DE VOITURES PAR HEURE. | 72 |
| TABEAU 20 - TABLEAU DES P-VALUES RESULTANTES DU TEST DE STATISTIQUE NON-PARAMETRIQUE DE WILCOXON POUR LES DONNEES TRAFIC MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE COMMUNE POUR L'ANNEE 2019 ET L'ANNEE 2020..... | 74 |
| TABEAU 21 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONCENTRATIONS EN PM _{2,5} MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE (DE LA PERIODE CONF1 A LA PERIODE P1A) POUR L'ANNEE 2020. LES CONCENTRATIONS S'EXPRIMENT EN µG/M ³ | 75 |
| TABEAU 22 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONCENTRATIONS EN PM _{2,5} MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE (DE LA PERIODE P1B A LA PERIODE P4) POUR L'ANNEE 2020. LES CONCENTRATIONS S'EXPRIMENT EN µG/M ³ | 75 |
| TABEAU 23 - TABLEAU INDIQUANT LES PAIRES DE VALEURS DE LA VARIABLE QUALITATIVE COMBINEE POUR LESQUELLES LA P-VALUE EST SUPERIEURE A 0.05 LORSQUE LA PERIODE EST IDENTIQUE. | 79 |
| TABEAU 24 - TABLEAU INDIQUANT LES PAIRES DE VALEURS DE LA VARIABLE QUALITATIVE COMBINEE POUR LESQUELLES LA P-VALUE EST SUPERIEURE A 0.05 LORSQUE LA RUE EST IDENTIQUE. | 79 |
| TABEAU 25 - TABLEAU INDIQUANT LES PAIRES DE VALEURS DE LA VARIABLE QUALITATIVE COMBINEE POUR LESQUELLES LA P-VALUE EST SUPERIEURE A 0.05 LORSQUE LA RUE ET LA PERIODE SONT DIFFERENTES. | 79 |

| | |
|--|----|
| TABLEAU 26 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU TRAFIC ET DES CONCENTRATIONS EN $PM_{2,5}$ MESUREES DANS LES RUES AUTOUR DE L'INDA DURANT LA PERIODE D'ETUDE POUR L'ANNEE 2020..... | 80 |
|--|----|

Liste des abréviations

CNS : Conseil National de Sécurité

Covid-19 : Coronavirus disease 2019 (ou Maladie à coronavirus 2019)

INDA : Institut Notre-Dame d'Arlon

ISSeP : Institut Scientifique de Service Public

OMS / WHO : Organisation Mondiale de la Santé / World Health Organization

SARS CoV-2: Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2

SAM : Sensing of Atmospheres and Monitoring

SRAS CoV-2 : Coronavirus 2 du Syndrome Respiratoire aigu sévère

ULiège : Université de Liège

I. Mise en contexte / Préambule

Ce mémoire a été réalisé dans un contexte particulier. En effet, l'année 2020 a été marquée par une pandémie virale conduisant à une vie ralentie tant sur le plan économique que sur le plan social dans le monde entier et donc aussi dans le cas d'étude qui sera présenté plus loin.

Cette pandémie est due à un coronavirus appelé SARS-CoV-2 ou encore SRAS-CoV-2 pour « Coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère ». La maladie liée à cette infection est nommée Covid-19 pour Coronavirus Disease 2019 ou encore maladie à coronavirus 2019. Cet agent pathogène a été découvert à Wuhan en Chine en décembre 2019. Il a ensuite été classé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme urgence de santé publique de portée internationale le 30 janvier 2020 et enfin comme pandémie à partir du 11 mars 2020 (Wikipédia, 2020b).

Malgré le consensus scientifique pour sa dénomination de SARS-CoV-2, ce virus est parfois appelé coronavirus de Wuhan, hCoV-19 pour Human Coronavirus ou encore nouveau coronavirus 2019 (2019-nCoV) (Kern, 2020; Wikipédia, 2020b). Le virus en question proviendrait probablement de la recombinaison d'un virus de chauve-souris et de pangolin qui aurait eu lieu chez le pangolin mais l'origine reste encore hypothétique (Wikipédia, 2020b).

La maladie résultante de cet agent pathogène présente notamment des symptômes liés à l'appareil respiratoire tels que (Wikipédia, 2020c, 2020b):

- Fièvre ;
- Toux ;
- Dyspnée (gêne respiratoire) ;
- Perte totale de l'odorat et de goût ;
- Fatigue ;
- Maux de gorge ;
- Troubles gastro-intestinaux.

Dans certains cas, la maladie à coronavirus 2019 conduit au décès du patient. Certains critères propres à l'individu amplifient la maladie. Les personnes présentant ces critères seront identifiées « personnes à risques ». Les facteurs de risque ne seront pas décrits dans le présent document. Le SARS-CoV-2 présente une série de caractéristiques conduisant à une contagion d'autant plus importante de celui-ci. Parmi celles-ci :

- Période d'incubation de 2 à 14 jours avec une période moyenne de 5 jours (Wikipédia, 2020c, 2020b) durant laquelle un individu peut en contaminer un autre ;
- Existence de porteurs asymptomatiques (Wikipédia, 2020b) ;
- Absence de traitement efficace et reconnu (Wikipédia, 2020c) ;
- Multiplicité de voies de transmissions (salive, voie de respiration directe, contact avec surface ou objet infecté, par des particules nasales ou fécales, par des eaux usées, par les yeux, etc) (Wikipédia, 2020c) ;
- Survie du virus pendant plusieurs heures dans l'environnement et conservation de son caractère infectieux (Wikipédia, 2020b).

Au vu de ces diverses caractéristiques, les autorités gouvernementales ont dû prendre des mesures à caractère préventif notamment (Wikipédia, 2020c) :

- Utilisation de savons et de désinfectants car le virus y est sensible ;
- Instauration de mesures-barrières telles que la distanciation sociale ;
- Port de masque et/ou de gants ;
- Surveillance des symptômes précurseurs de la maladie.

Un suivi a été effectué par les autorités par rapport à l'évolution du virus au sein du pays. Une évolution des règles imposées par les autorités gouvernementales afin de limiter la propagation du virus a conduit à une modification du comportement habituel des citoyens et donc les mesures effectuées dans le cadre de ce mémoire se sont vues impactées elles aussi. En effet, le mémoire poursuivait initialement l'objectif d'étudier la concentration en PM_{2,5} aux différentes entrées de l'Institut de Notre-Dame d'Arlon (INDA) à l'aide de capteurs low-cost et de comparer ces mesures lors d'une journée scolaire traditionnelle qui s'accompagne d'un trafic scolaire caractéristique (dépôt et reprise des élèves) et une journée de vacances scolaires. Par ce suivi et cette étude, il aurait été possible de suivre l'évolution de la concentration en PM_{2,5} aux entrées de l'établissement scolaire et d'identifier les modifications de cette concentration durant les périodes d'intense trafic scolaire. Il aurait ensuite été possible de réaliser un

comparatif avec la législation en vigueur et, le cas échéant, de formuler une série de recommandations pour la qualité de l'air respiré par les élèves fréquentant l'établissement.

Cependant, les dispositions prises par les autorités gouvernementales (notamment l'arrêt de fréquentation des établissements scolaires durant la période d'épidémie) ont fortement modifié le cas d'étude initial.

Pour débiter ce travail, la première partie sera dédiée aux mesures prises dans le cadre de la pandémie en Belgique et notamment les périodes et les dates clés seront reprises ici. Pour débiter cette partie, il est intéressant d'expliquer brièvement le plan de gestion des risques prévu par le SPF santé publique :

- Phase 1 : phase au cours de laquelle on tente de maintenir le virus en dehors du pays et des procédures de quarantaines peuvent être mises en place (Messoudi, 2020a; Wikipédia, 2020d) ;
- Phase 2 : le virus est identifié sur le pays et il est mis en place un suivi et une surveillance des personnes infectées afin de tenter de stopper la propagation de celui-ci (Messoudi, 2020a; Wikipédia, 2020d);
- Phase 3 : les mesures deviennent plus restrictives et les citoyens sont contraints de rester enfermés chez eux, les lieux publics sont fermés et les rassemblements interdits (Messoudi, 2020a; Wikipédia, 2020d).

D'un point de vue épidémiologique, la situation en Belgique a atteint le stade de phase 2 à partir du 1^{er} mars, le stade de « phase 2 renforcée » à partir du 9 mars mais n'est jamais entrée en phase 3 (Burgraff, 2020; Messoudi, 2020b; Wikipédia, 2020d).

Regardons à présent les dates importantes liées à la pandémie en Belgique. Les dates présentées font essentiellement référence aux différentes séances tenues par le Conseil National de Sécurité (CNS), un organisme belge (accompagné d'experts de la situation) qui a fixé les grandes lignes politiques et règles à suivre durant la pandémie du virus.

Le 4 février 2020 débute la véritable pandémie en Belgique avec un premier cas confirmé sur le territoire belge. Le cas en question est l'un des Belges rapatriés de Chine, point de départ de la pandémie. Les personnes rapatriées sont placées en quarantaine dans des zones distinctes en fonction du résultat du test de dépistage (Wikipédia, 2020d).

A partir du 11 mars 2020, la Wallonie interdit les visites et les sorties des résidents de maisons de repos jusqu'au 31 mars afin de mettre à l'écart une partie de la population sensible au SARS-CoV-2. (Belga, 2020; Wikipédia, 2020d). Cette date correspond aussi au premier décès lié au SARS-CoV-2 en Belgique (Wikipédia, 2020d).

Le 12 mars 2020 est une date importante dans l'évolution de la situation vécue par la Belgique face à la maladie à coronavirus 2019. En effet, cette date correspond à la première réunion du CNS conduisant à la décision d'une série de mesures qui seront d'application à partir du vendredi 13 mars à minuit. Parmi ces mesures, il figure notamment :

- Les activités récréatives, sportives, culturelles ou folkloriques sont annulées, peu importe la taille et s'il s'agit d'événements publics ou privés (Flament, 2020; Wikipédia, 2020d).
- Les magasins fournissant des services essentiels restent ouverts tandis que les autres sont fermés les week-ends (belgium.be, 2020b).
- La suspension des leçons de l'enseignement obligatoire à partir du lundi 16 mars (Flament, 2020; Wikipédia, 2020d);
- Le maintien de l'ouverture des crèches malgré la décision de fermeture des écoles (Flament, 2020) ;
- Fermeture des discothèques, des cafés et des restaurants à partir du 16 mars (Wikipédia, 2020d).
- Le télétravail doit être privilégié (belgium.be, 2020b).

Le 17 mars 2020 un nouveau CNS est tenu et il y est décidé un confinement de la population à partir du 18 mars à 12h00 (Wikipédia, 2020d). L'objectif de ce confinement est de réduire les interactions entre les citoyens et limiter ceux-ci à la famille proche (sous-entendant ceux vivant sous le même toit). Les déplacements, et donc le trafic (objet de notre étude) sont fortement réduits. Les citoyens doivent rester chez eux, les seuls déplacements suivants sont autorisés (IPC Videohouse, 2020) :

- Déplacements pour se rendre au travail (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020) ;

- Déplacements indispensables tels que ceux pour aller chez le médecin, au magasin d'alimentation, à la poste, à la banque, à la pharmacie, pour prendre de l'essence ou aider des personnes dans le besoin (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020).

Les activités en plein air sont autorisées mais par groupe de maximum 2 personnes, soit avec un membre de sa famille vivant sous le même toit, soit avec un ami, à condition de respecter une distance raisonnable entre les personnes. Le télétravail doit être appliqué pour toutes les fonctions où c'est possible (ce qui réduit le trafic sur les routes). Si ce n'est pas possible, les règles de distanciation sociale doivent être respectées. Si ces mesures de distanciation ne sont pas respectées, l'entreprise est contrainte de fermer (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020)

Les magasins et commerces non essentiels sont fermés, seuls les magasins suivants restent ouverts :

- Magasins alimentaires (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020);
- Pharmacie (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020);
- Magasins pour animaux (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020);
- Librairies (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020) ;
- Postes (IPC Videohouse, 2020) ;
- Banques (IPC Videohouse, 2020).

Une réglementation de surface est imposée, une personne par 10 m², ainsi qu'une durée maximale de 30 minutes dans les magasins alimentaires type grande surface. Les transports en commun doivent maintenir la distanciation sociale et pour notre cas d'étude, voient leur fréquence réduite et le passage en horaire de vacances (cfr Annexe 4). Les voyages en dehors de la Belgique qui ne sont pas indispensables seront interdits jusqu'au 5 avril. Les marchés sont fermés. Le non-respect de ces mesures sera puni par des amendes. Celles-ci sont d'application jusqu'au 5 avril inclus (belgium.be, 2020a; IPC Videohouse, 2020).

Les coiffeurs peuvent encore ouvrir avec 1 coiffeur par salon uniquement (IPC Videohouse, 2020). Cependant, cette décision sera modifiée lors du Conseil des ministres électronique le mardi 24 mars et ils doivent eux aussi fermer à partir du 24 mars minuit et ce jusqu'au 5 avril (belgium.be, 2020c).

Un nouveau CNS a été tenu le 27 mars 2020. Il y a été décidé que les mesures prises lors du CNS du 17 mars, c'est-à-dire les mesures liées au confinement de la population, seront prolongées jusqu'au 19 avril. Les mesures prises lors du CNS du 13 mars (fermeture des écoles, de l'Horeca, etc) sont toujours d'actualité. Les mesures peuvent être renouvelées jusqu'au 3 mai (belgium.be, 2020i; NVR CNS, 2020c).

Un nouveau CNS a lieu le 15 avril 2020. Lors de ce dernier, il est décidé que les mesures de confinement seront prolongées jusqu'au 3 mai. Cependant, certains magasins tels que les magasins de bricolage, de jardinerie et les pépinières peuvent rouvrir, moyennant le maintien des mesures de distanciation (belgium.be, 2020g; NVR CNS, 2020a; Wikipédia, 2020d). Lors de ce CNS, il était prévu initialement d'accorder aux résidents des maisons de repos, des établissements de soin et des centres pour personnes avec un handicap, la visite d'un proche désigné qui présenterait une série de critères définis. Mais dès le 17 avril, il est annoncé que ces visites n'auront pas lieu (Messoudi, 2020c; Wikipédia, 2020d).

Au cours de ce CNS, il est mentionné que les chantiers peuvent continuer leur activité moyennant la distanciation sociale nécessaire et qu'il en est de même pour les parcs à conteneur (NVR CNS, 2020a). Suite à cette annonce, il a notamment été observé la reprise de l'activité du chantier à la rue Joseph Netzer de notre cas d'étude.

Le 24 avril 2020 se tient un CNS important dans l'évolution de l'activité humaine. En effet, au cours de celui-ci, les différentes stratégies de déconfinement ont été explicitées et datées par rapport aux prévisions réalisées à l'aide des indicateurs sanitaires actuels (belgium.be, 2020h; Wikipédia, 2020d). Ces stratégies se divisent en une série de phases.

A partir du 04 mai 2020, la Belgique débute le « déconfinement ». Celui-ci s'accompagne de phases dont les dénominations peuvent porter confusion avec les phases du plan de gestion des risques prévus par le SPF santé publique. L'ensemble des phases dont il est fait mention ultérieurement n'ont donc pas de liens avec celles du plan susmentionné. Maintenant que cette précision a été formulée, le 04 mai 2020, la Belgique entre en « **phase 1A** » correspondant à la réouverture des industries ainsi que les services B2B (on entend par ici les entreprises pour lesquelles il n'y a pas de contact direct entre le client et le commerçant) (belgium.be, 2020h; NVR CNS, 2020b; Wikipédia, 2020d). Les passagers des transports en commun doivent porter obligatoirement un masque bucco-nasal. Il est enfin possible de

pratiquer des activités sportives avec 2 personnes de plus que celles vivant sous le même toit (belgium.be, 2020h; Wikipédia, 2020d).

A partir du 11 mai 2020, le pays passe en « **phase 1B** ». Cette phase consiste en l'ouverture de tous les commerces pour lesquels il n'y a pas de contacts physiques et où les mesures sanitaires peuvent être appliquées (belgium.be, 2020h; Wikipédia, 2020d).

Le Conseil National de Sécurité qui s'est tenu le 06 mai 2020 a indiqué aussi que chaque foyer pourra accueillir jusqu'à 4 personnes à partir du 10 mai 2020 (belgium.be, 2020j). Il est demandé aux citoyens de s'orienter vers les commerces les plus proches sur le plan géographique. Les professions impliquant des contacts physiques en dehors de celles dans le milieu médical restent à l'arrêt pour le moment. Il en est de même pour les marchés en plein air (belgium.be, 2020j).

Dès le 18 mai 2020, la Belgique passe en « **Phase 2** » de déconfinement. Cette phase s'accompagne d'une série de mesures telles que :

- Ouverture des musées et des parcs animaliers sous certaines conditions telles que la mise en place d'un plan de circulation, la mise en place de billetterie en ligne, etc (belgium.be, 2020h, 2020f; Wikipédia, 2020d) ;
- Reprise des entraînements physiques en plein air au sein d'un club moyennant le respect des mesures sanitaires et la limitation à un groupe de 20 personnes (belgium.be, 2020h, 2020f; Wikipédia, 2020d) ;
- Autorisation de réunions privées à domicile selon certaines conditions (Wikipédia, 2020d) ;
- Elargissement au nombre de 30 personnes pour les mariages et les enterrements (belgium.be, 2020f; Wikipédia, 2020d) ;
- Autorisation de réaliser des excursions d'une journée (Wikipédia, 2020d) ;
- Reprise de l'enseignement en favorisant les années en fin de cycles et en établissant certaines mesures à respecter (belgium.be, 2020h; Wikipédia, 2020d).

Un CNS a eu lieu le 13 mai 2020 pour définir plus amplement les conditions selon lesquelles la phase 2 de déconfinement aura lieu. Au cours de celui-ci, il est indiqué que les maternelles restent fermées et que l'enseignement supérieur a déjà effectué sa fin d'année académique (belgium.be, 2020f).

Les métiers de contact ainsi que les marchés en plein air peuvent reprendre moyennant le respect des mesures sanitaires en vigueur et certaines conditions organisationnelles (belgium.be, 2020f).

A partir du 8 juin 2020, le pays passe en « **Phase 3** ». Cette phase a été largement décrite lors de la conférence de presse suivant le CNS du 3 juin 2020. Elle est caractérisée par un assouplissement important des règles de confinement appliquées jusqu'alors (Wikipédia, 2020d). On retrouve toujours parmi celles-ci, les règles sanitaires et les mesures individuelles visant à réduire la propagation du virus (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d).

Voici les changements qui accompagnent le passage en phase 3 :

- Elargissement de la bulle d'un foyer à 10 personnes par semaine et par individu ;
- L'Horeca peut reprendre son activité sous certaines conditions (il ne s'agit pas ici des salles de banquet/de réception et de jeux qui ne peuvent rouvrir que le 1^{er} juillet) (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d) ;
- Les activités culturelles (dont les cinémas font partie) ne peuvent être réalisées qu'en l'absence de public à partir du 8 juin 2020. Les représentations avec public doivent attendre le 1^{er} juillet (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d) ;
- Les activités sportives indoor peuvent reprendre à l'exception des piscines (saunas et centres bien-être compris). Les activités sportives de contact doivent se limiter à des entraînements sans contact (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d) ;
- Les activités de culte peuvent reprendre en respectant les conditions sanitaires ainsi qu'un nombre de 100 personnes maximum en juin et jusqu'à 200 personnes en juillet. Il n'est pas autorisé d'avoir des contacts physiques durant ces séances de culte (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d) ;
- Les voyages et les excursions de plusieurs jours sont autorisés en Belgique dès le 8 juin. La Belgique rouvre ses frontières dès le 15 juin 2020 (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d) ;
- Les activités de loisir et de détente sont autorisées dès le 8 juin 2020. Parmi celles-ci, les conférences, les parcs d'attraction et les plaines de jeu en intérieur ne sont pas autorisées (belgium.be, 2020e; Wikipédia, 2020d).

Ces mesures sont d'actualité jusqu'à la **phase 4** du déconfinement qui débute le 1^{er} juillet 2020 et qui fut décrite lors du conseil national de sécurité du 24 juin 2020. Les nouvelles mesures seront brièvement décrites ici puisque seules les données trafic s'étendent jusqu'à la phase 4. Les mesures effectuées pour les PM_{2,5} s'étendent quant à elles du 17 mars au 25 juin 2020. A partir du 1^{er} juillet 2020, une série d'activité devient à nouveau accessible selon certaines conditions (parcs d'attraction, cinémas, centres de bien-être, théâtres, casinos, salles de réception et de fête avec 50 personnes maximum, possibilité d'événements ponctuels dans l'espace public moyennant une régulation de la capacité, possibilité d'aller au magasin avec des personnes de sa bulle de contact et sans limite de temps, plus de limite d'étals pour les marchés, etc) (belgium.be, 2020d).

Afin d'observer les différentes phases de manière plus imagée, une ligne du temps a été réalisée sur base des éléments récoltés ci-dessus. Celle-ci reprend les dates clé de la gestion de la pandémie par les autorités gouvernementales.

On peut, de manière implicite, relier cette ligne du temps à l'activité humaine propre à chaque période. En effet, on peut concevoir que l'activité humaine se voit réduite lors des périodes pour lesquelles les autorités gouvernementales ont fixé des contraintes importantes (fermeture de certains secteurs, déplacements essentiels, etc).

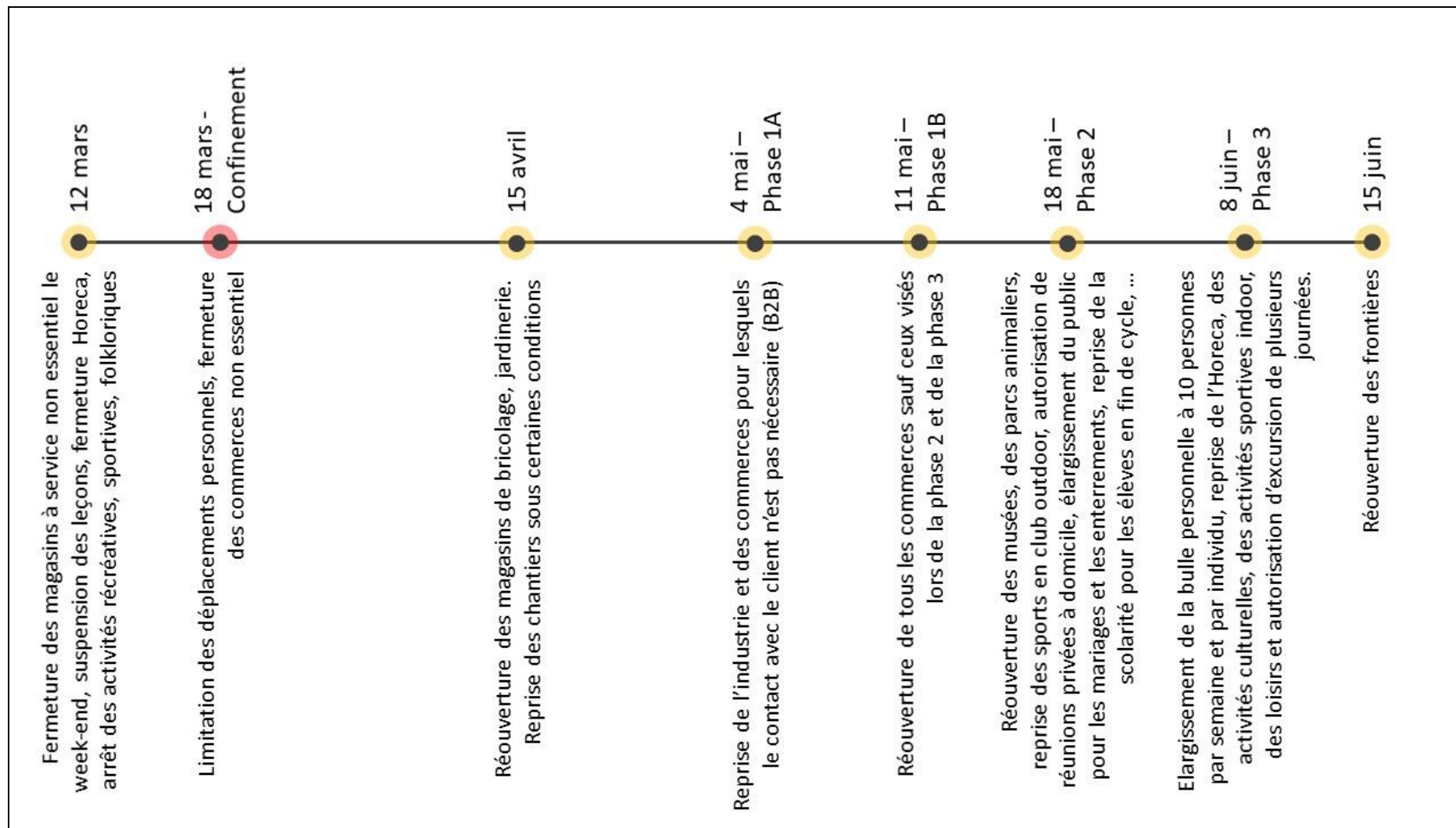


Figure 1 - Ligne du temps caractérisant les différentes périodes pour lesquelles les autorités gouvernementales ont formulé des restrictions par rapport aux activités des citoyens.

II. Introduction et objectifs

Aujourd'hui, c'est une évidence que de s'intéresser à la qualité de l'air ambiant, que ça soit l'air respiré à l'intérieur de son domicile, mais aussi l'air respiré lors de la vie en extérieur. La diversité de polluants pouvant impacter cette qualité est étudiée de plus en plus largement, ainsi que les interactions qu'ils peuvent avoir sous forme de cocktails de polluants tant sur le plan sanitaire que sur le plan environnemental. Cependant, ce qui semble une évidence aujourd'hui ne l'a pas toujours été. En effet, la pollution de l'environnement dans lequel l'être humain évolue ne s'est pas réalisée soudainement. Celle-ci est l'œuvre du contrecoup d'un développement rapide dans de nombreux secteurs, souvent énergivores, tels que le confort résidentiel (chauffage, électricité), industriel, transport, etc. Il a fallu de nombreuses années où il y a eu pollution sans que l'être humain ne se rende compte qu'il compromettrait son environnement et sa santé. Ainsi, c'est seulement le 17 octobre 2013 que le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a reconnu la pollution de l'air extérieur comme l'une des premières causes environnementales de décès par cancer. Mais le cancer n'est pas la seule maladie engendrée par celle-ci ! En effet, la pollution de l'air constitue un facteur de risque environnemental dominant, responsable de nombreux décès prématurés en Europe puisqu'elle augmente l'incidence d'une grande diversité de maladies (Romain, 2019).

C'est ainsi que l'engrenage fut lancé et que la pollution de l'air, qu'elle soit à l'extérieur ou à l'intérieur fut étudiée tant sur le plan de l'émission où les objectifs poursuivis semblent tendre vers une limitation de celle-ci que sur le plan de l'immission où l'étude se fait directement sur les individus en contact de cet air chargé en polluants et des impacts sur leur santé. Ce travail s'articule dans cette idée d'étude de plus en plus large de la pollution de l'air et se concentre sur un polluant en particulier regroupé sous le terme générique de particules en suspension. Les particularités de ce polluant seront décrites plus largement au point suivant mais l'intérêt sera porté sur la fraction des $PM_{2,5}$ mesurés autour d'un établissement scolaire fondamental et secondaire à l'aide de capteurs low-cost qui sont utilisés de plus en plus largement dans l'étude de pollutions atmosphériques.

Ce travail avait pour objectif de poursuivre une étude réalisée l'année précédente en mesurant les concentrations en $PM_{2,5}$ autour de l'établissement scolaire et de faire le lien avec le trafic lié à la dépose et à la reprise scolaire. Malheureusement, le contexte de pandémie due au coronavirus expliqué dans le point précédent a contraint les établissements scolaires à suspendre leurs cours pour raisons sanitaires et il a été nécessaire de réorienter le travail en fonction. Malgré ce contexte de pandémie, il a été possible de poursuivre la campagne de mesures comme de normal, ce qui a permis d'obtenir des données exceptionnelles dans un contexte particulier pouvant s'apparenter à l'inactivité « totale » d'une ville.

Ce travail poursuit une série d'objectifs dont le thème général est la qualité de l'air et plus précisément les concentrations en $PM_{2,5}$. Ces concentrations ont-elles été influencées par la mise en place d'une procédure de confinement (afin d'endiguer la pandémie de covid-19) s'accompagnant d'une multitude de restrictions formulées par les autorités gouvernementales concernant la vie du citoyen et l'activité humaine au sens large en milieu urbain ? Cette question peut s'articuler en une suite d'étapes qui poursuivent une série d'objectifs tels que :

- 1) Déterminer l'incertitude entre les capteurs utilisés pour monitorer le site d'étude ;
- 2) Déterminer si le confinement de l'année 2020 a influencé les concentrations mesurées par une station de référence la plus proche du site d'étude (en l'occurrence, il s'agit ici d'une station en milieu rural) ;
- 3) Déterminer s'il est correct d'extrapoler l'information mesurée au niveau de la station de référence par rapport à notre site d'étude ;
- 4) Déterminer si l'activité humaine est effectivement impactée par les décisions prises par les autorités gouvernementales au niveau du site d'étude en centre urbain et si oui, dans quelles proportions ? ;
- 5) Identifier les caractéristiques du trafic pour l'année 2020 en fonction des 3 rues mais aussi en fonction des différentes phases caractérisant la période de confinement/déconfinement ;
- 6) Déterminer si les concentrations mesurées en $PM_{2,5}$ suivent les mêmes tendances que l'activité humaine et déterminer si celles-ci sont corrélées dans notre contexte géographique.

III. Les particules

III.1. Définition et généralités

Dans le contexte de la pollution atmosphérique, les polluants sont généralement définis par leur composition chimique. En effet, il existe parmi ceux-ci des molécules telles que les NO_x, le CO, O₃, des COVs (Composés Organiques Volatiles), des HAPs (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique), et bien d'autres. Ce travail se concentre sur une catégorie de polluants qui se définit sur base de ses dimensions et donc plutôt sur une propriété physique et non chimique. Ce groupe est repris sous un terme générique provenant de l'anglais : PMs pour « Particulate Matter ». En français, c'est le terme de particules, ou encore particules en suspension, qui est appliqué pour représenter cette catégorie particulière de polluants. Celui-ci désigne un ensemble de corps microscopiques, solides ou liquides, qui restent en suspension dans l'air. Ce mélange avec l'air porte le nom d'aérosol (AWAC & ISSeP, 2017; Blin, Higué, Petit, & Brahy, 2007; Wikipédia, 2020e).

III.2. Caractéristiques

Les particules sont généralement représentées sous forme de sphère. Elles peuvent prendre cependant une multitude de formes telles que des formes fibreuses, cristallines, etc, diversifiant ainsi les compositions physiques de celles-ci. Par facilité, même lorsque les PMs ne sont pas sphériques, elles sont ramenées à ce qu'on appelle un diamètre aérodynamique (correspond au diamètre moyen qu'aurait une sphère de comportement aérodynamique équivalent) qui permettra de les classer (Blin et al., 2007; Rami Alfarra, 2004; Riffault, 2019; Wikipédia, 2020e) :

- TSP : particules totales en suspension de diamètre moyen inférieur à 75 µm (Blin et al., 2007) ;
- PM₁₀ : particules grossières (Riffault, 2019);
- PM_{2,5} : particules fines (Riffault, 2019);
- PM₁ : particules très fines (Riffault, 2019);
- PM_{0,1} : particules ultrafines (Riffault, 2019).

Il est important de comprendre qu'il s'agit de fractions liées à la taille des particules, chaque indice donne une indication sur le diamètre maximum que peut prendre la sphère dans la fraction correspondante. Ainsi, les PM₁₀ correspondent à toutes les particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm, les PM₁ correspondent à toutes les particules dont le diamètre est inférieur à 1 µm et ainsi de suite. Il faut donc voir ces différentes fractions sous forme d'ensembles comme représenté à la *Figure 2* (Riffault, 2019).

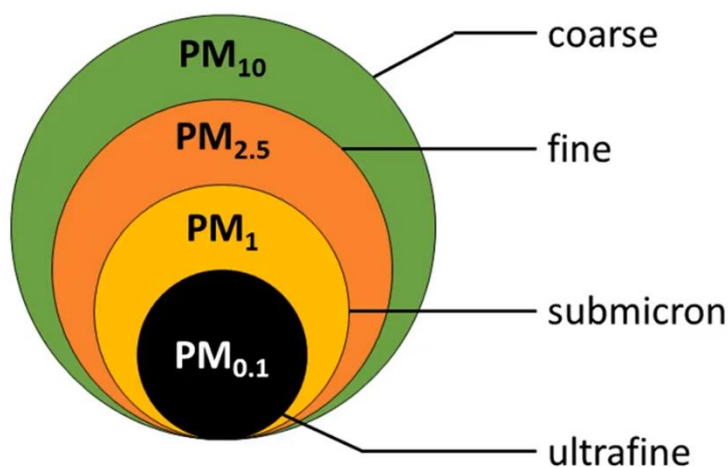


Figure 2 - Fractions des particules en fonction de la taille de celles-ci. Source : Riffault, 2019

Il existe aussi une diversité importante dans la composition chimique qu'une particule peut prendre, celle-ci dépend notamment de la nature des sources d'émission autour de la particule ainsi que des diverses transformations qu'elle peut subir au cours de son voyage dans l'atmosphère (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020b). La particule se définit selon 2 grandes fractions (*Figure 3*) :

- La fraction inorganique (minérale) contient des sulfates, des nitrates, des métaux lourds, (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020b) ;
- La fraction organique fait référence à toute la partie contenant des atomes de carbone. Il y sera distingué le carbone élémentaire et le carbone organique (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020b).

Le carbone élémentaire correspond à la partie de l'échantillon contenant des atomes de carbone chimiquement inerte tandis que le carbone organique correspond à des composés carbonés présentant des particularités propres aux grandes familles fonctionnelles au sens de la chimie organique (alcools, aldéhyde, etc) (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020b).

Maintenant que cette distinction a été réalisée, il est intéressant d'aborder le concept de « Black carbon ». Celui-ci se définit comme la fraction carbonée provenant d'une combustion et de couleur noire, lui permettant d'absorber toutes les radiations de la lumière visible. Pour mesurer le contenu en carbone dans un aérosol, il existe 2 techniques différentes. L'une est dite thermique et l'autre repose sur un instrument dont la dénomination est « Aethalometer » ou « Aethalomètre » en français. La 1^{ère} méthode permet de doser le carbone élémentaire et le carbone organique définis auparavant tandis qu'avec l'aethalomètre, la mesure du « Black carbon » se fait véritablement. De manière idéalisée, les mesures de « Black carbon » et de carbone élémentaire doivent être étroitement corrélées (AWAC & ISSeP, 2012, 2017).

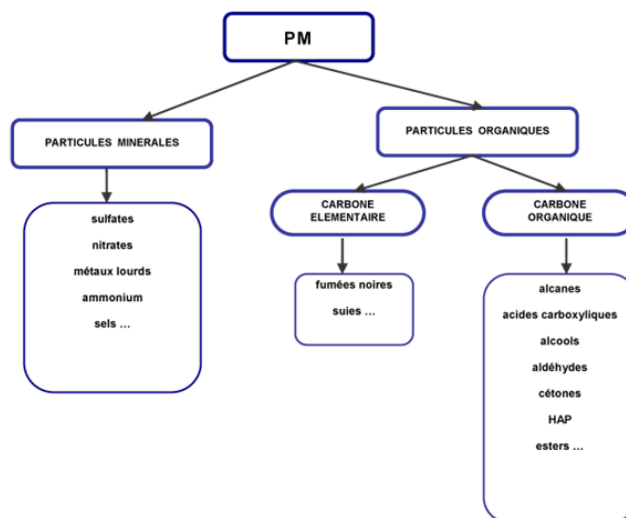


Figure 3 – Composition chimique d'une particule.
Source : CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020b

Le carbone noir n'est donc pas considéré comme le carbone élémentaire mais il existe un lien entre ces deux notions. Le carbone noir est en réalité une sous-classification des particules fines qui présente comme caractéristique de regrouper toutes les particules formées de carbone et qui sont « noires » ou plutôt qui absorbent la lumière (Bruxelles Environnement, 2020c; Romain, 2019). Ce polluant, fortement lié aux procédés de combustion, est caractérisé par des diamètres s'étendant de 10 à 500 nm (Figure 4). Lorsque celui-ci est supérieur à 100 nm, il s'agit en réalité d'une forme agrégée du « Black carbon » avec d'autres polluants.

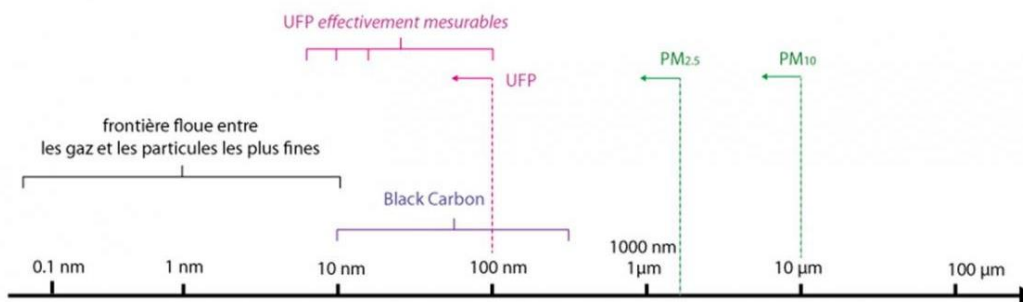


Figure 4 - Taille des particules – Source : (Bruxelles Environnement, 2020c)

III.3. Mode de formation

Il est important de distinguer deux types de particules en fonction de leur mécanisme de formation, les particules primaires et secondaires. Les premières sont des particules émises directement dans l'atmosphère alors que les secondes sont formées par l'oxydation de précurseurs gazeux tels que le SO₂, les NO_x et les COVs ou la condensation de gaz (AWAC & ISSeP, 2017; Rami Alfarrá, 2004).

La Figure 5 reprend les différents modes selon lesquels les particules sont classées en fonction de leur taille, le procédé de formation de l'aérosol et de la durée durant laquelle l'aérosol évolue dans l'atmosphère (Rami Alfarrá, 2004).

Les particules ultrafines regroupent 2 modes. Le premier correspond aux particules dont la taille est comprise entre 1 et 10 nm. Ces particules sont formées suite à un processus de conversion gaz-particules depuis des précurseurs gazeux. Ce type de mode prend le terme de nucléation (Aouizerats, 2010; Riffault, 2019). Le second mode prend la dénomination de mode d'Aitken et s'applique aux

particules dont le diamètre s'étend de 10 à 100 nm. Les particules sont ici générées par des phénomènes de condensation de gaz chauds, de vapeur d'eau sur des nano-particules déjà existantes (celles provenant du mode de nucléation). Ce mode s'observe notamment dans les procédés de combustion (Aouizerats, 2010; Riffault, 2019).

Le mode qui suit présente une frontière plus floue concernant la taille des particules. En effet, selon la littérature, ce mode s'étend jusqu'aux particules très fines (PM_{10}) ou jusqu'aux particules fines ($PM_{2,5}$) et il prend le terme de mode d'accumulation. Celui-ci est caractérisé par un regroupement des particules ultrafines suite à des phénomènes de condensation ou de coagulation. La coagulation correspond au regroupement de particules ultrafines alors que la condensation concerne des gaz changeant de phase sur des particules préexistantes, conduisant au grossissement de la taille de la particule (Aouizerats, 2010; Riffault, 2019).

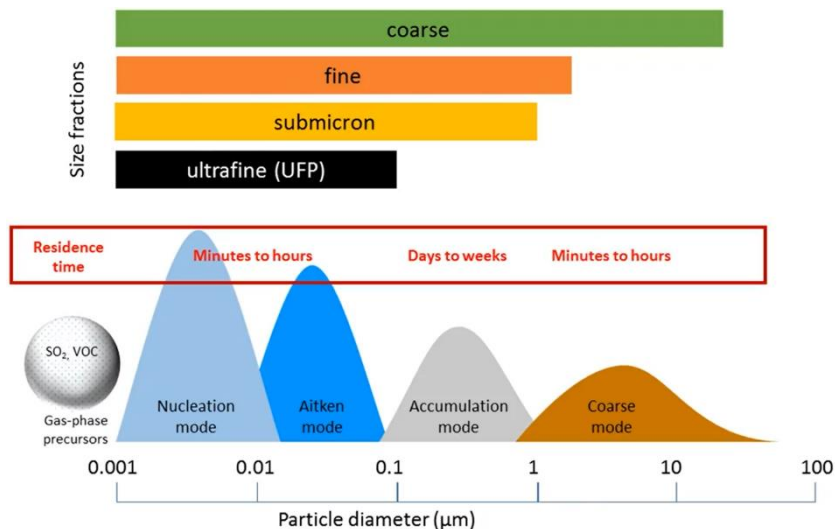


Figure 5 - Modes de formation des particules secondaires, taille des fractions de particules et temps de résidence
Source : Riffault, 2019

Enfin le dernier mode est appelé « Coarse mode » et se traduit par le mode grossier en français. Ce mode correspond aux particules dont le diamètre est supérieur à 1 ou 2,5 μm en fonction des limites définissant le mode d'accumulation vu auparavant. Ce mode est surtout caractérisé par des processus mécaniques comme l'abrasion par le vent ou encore l'érosion du sol (Aouizerats, 2010; Riffault, 2019)

Sur la Figure 5, il est indiqué une information par rapport au temps de résidence. Cette information est reprise au point suivant.

III.4. Temps de vie des particules

Le temps de vie des particules est un élément complexe dont il faut généralement tenir compte dans les modèles. Celui-ci est déterminé par une série de paramètres tels que :

- La taille (plus les particules sont petites, plus elles ont un temps de résidence important) (Riffault, 2019; Romain, 2019);
- La composition chimique (celle-ci peut favoriser les interactions avec des molécules d'eau par exemple) ;
- L'altitude à laquelle elle est émise (plus la particule sera émise à haute altitude, plus elle présentera une durée de vie importante) ;
- Les conditions météorologiques

La Figure 5 vue auparavant représente le temps de résidence des différents modes propres aux particules secondaires. Les modes de nucléation et d'Aitken correspondant à la fraction des particules ultrafines sont caractérisés par des temps de résidence de l'ordre de la minute, voire de quelques heures. Ceci s'explique par le fait que ces particules ultrafines vont être éliminées par des impacts sur certaines surfaces ou par le phénomène de coagulation qui permet à ces particules de très petit diamètre de grossir afin d'atteindre le mode d'accumulation. Le mode d'accumulation présente quant à lui le temps de résidence le plus long (de quelques jours à quelques semaines) puisque les phénomènes de croissance particulaire et les mécanismes d'élimination sont moins efficaces pour les particules de cette dimension. Enfin, le mode grossier quant à lui, présente un temps de résidence du même ordre que les modes propres aux particules ultrafines car elles sédimentent rapidement (Riffault, 2019).

La Figure 6 représente les passages d'une couche de l'atmosphère à une autre. Cette figure met en avant l'altitude comme paramètre influençant la durée de vie des particules. Généralement, les

particules formées au sol restent dans la couche limite atmosphérique (« Planetary boundary layer » sur la figure) correspondant à la partie basse de la troposphère. Celle-ci est marquée par des influences de la surface de la Terre et un mélange vertical important y est observé ce qui conduit à des durées de vie de l'ordre d'1 semaine au maximum. Dans certaines situations, les particules peuvent atteindre la « troposphère libre » notamment si les conditions dynamiques le permettent mais aussi si l'émission se réalise directement dans cette partie de la troposphère (ça peut être le cas lors de feux de forêts importants ou encore des éruptions volcaniques). Si les particules atteignent la troposphère libre, le passage dans la stratosphère est facilité et la durée de vie de celles-ci va augmenter de manière considérable et elles vont pouvoir voyager sur de grandes distances et avoir des conséquences beaucoup plus largement (Riffault, 2019).

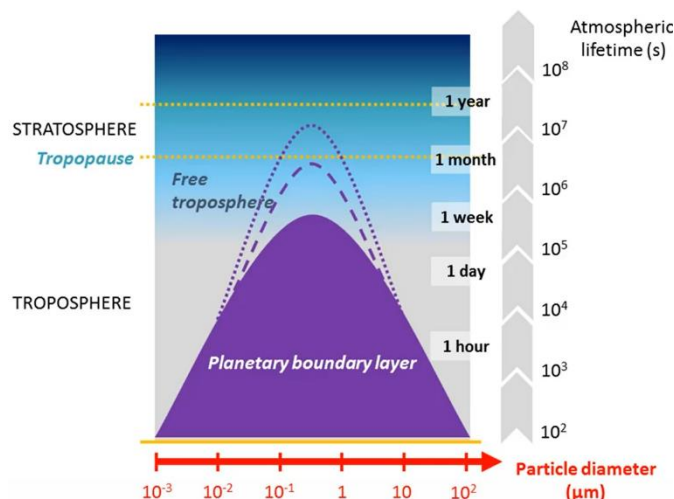


Figure 6 - Transport vertical dans l'atmosphère et temps de vie des particules. Source : Riffault, 2019

Maintenant que quelques paramètres influençant la durée de vie des particules ont été présenté, il est intéressant de discuter plus largement de la fin de vie des particules sous forme d'aérosol. Cette fin peut prendre le nom de dépôt sec ou d'impaction lorsque la particule sédimente et atteint naturellement la surface. L'autre possibilité est que la particule capte une gouttelette d'eau, notamment lors de périodes de précipitations, et c'est cette interaction qui conduit la particule à atteindre la surface du sol (celle-ci aurait continué son trajet dans l'atmosphère en l'absence de précipitations). Ce phénomène prendra la dénomination de « dépôt humide » (Aouizerats, 2010).

III.5. Sources

Comme expliqué auparavant, il existe des particules dites primaires et des particules dites secondaires. Le *Tableau 1* reprend de manière synthétique les sources des particules primaires et le *Tableau 2* est dédié aux particules secondaires. Ces tableaux ont été réalisés à l'aide des informations contenues dans le MOOC ainsi que sur le site de CELINE (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020a; Riffault, 2019).

| Particules primaires | |
|--|---|
| Sources naturelles | Sources anthropiques |
| Océans : sels marins | Procédés de combustions |
| Déserts : poussières désertiques | Suies (chauffage urbain) |
| Bio-aérosols : pollens, virus, bactéries, débris de plantes, etc | Fumée de cigarette |
| Eruptions volcaniques : cendres | Combustibles fossiles |
| Eruptions des sols : particules minérales | Combustion de déchets ou de bois |
| | Emissions industrielles |
| | Pratiques agricoles traditionnelles (feu) |
| | Usure des pneumatiques et des freins |
| | Remise en suspension des dépôts sur la chaussée |

Tableau 1 - Sources naturelles et anthropiques des particules primaires
Sources : CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020a; Riffault, 2019

La combustion permet la formation de particules carbonées telles que les suies, les particules ultrafines, fines et grossières. Plus la combustion est contrôlée (et donc complète), plus les particules formées seront fines (Riffault, 2019). De manière élargie, l'exposition de l'individu à l'intérieur de la maison se réalise car la combustion s'applique aussi à la cuisson d'aliments, l'utilisation d'encens ou de bougies,

ou encore lorsque les habitants se chauffent au bois et qu'il résulte du poêle à bois une combustion incomplète conduisant à la formation de particules (Kuske, 2019).

| Particules secondaires | |
|---|--|
| Sources naturelles | Sources anthropiques |
| Arbres et plantes : génération de COVs | Procédés de combustions : génération de NOx et de COVs |
| Eruptions volcaniques : génération de SO2 | Evaporation de solvants : génération de COVs |
| | Emission industrielle : génération de NOx, COVs et SO2 |
| | Fertilisants agricoles : génération de NH3 |

Tableau 2 - Sources des particules secondaires
Sources : CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020a; Riffault, 2019

III.6. Dispersion des particules en milieu urbain

III.6.1. Les secteurs producteurs de particules

Il est généralement admis qu'en milieu urbain, l'une des principales sources d'émissions polluantes correspond à la circulation des véhicules. La pollution est alors émise près du sol et la géométrie du milieu et des bâtiments peut prendre la forme d'une rue canyon qui amènerait à la stagnation de la pollution (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2015). Le principe des rues canyon et les conséquences de celles-ci sont décrits plus largement dans le point suivant.

L'amélioration de la qualité de l'air en milieu urbain doit passer par une bonification des méthodes liées au transport. En effet, puisque le trafic joue un rôle prépondérant dans la pollution de l'air en milieu urbain, pour que l'air urbain soit de meilleure qualité, il faut passer par une étape d'amélioration du combustible ainsi que des moteurs de manière élargie (Vardoulakis, Fisher, Pericleous, & Gonzalez-Flesca, 2003).

La Figure 7 représente les émissions des PM_{2,5} en fonction des différents secteurs. Celle-ci indique que même si le transport routier constitue une source de pollution des PM_{2,5}, d'autres sources et surtout le secteur résidentiel (essentiellement le chauffage) contribue largement aux concentrations mesurées.

Cette diversité des sources est notamment observable lors des journées sans voitures effectuées à Bruxelles. Ces journées thématiques sont généralement accompagnées de mesures afin d'identifier le comportement des polluants atmosphériques lorsqu'une source est arrêtée. Il résulte globalement, tant pour les PM₁₀ que les PM_{2,5} que les journées sans voitures ne conduisent pas à une diminution ou une augmentation considérable des concentrations démontrant ainsi la diversité des sources des particules fines mais aussi le caractère complexe décrivant la dispersion de celles-ci (Bruxelles Environnement, 2012).

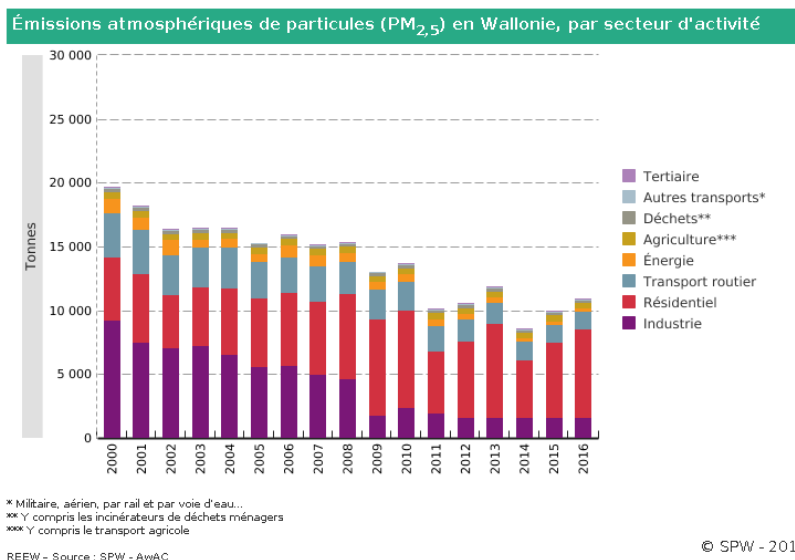


Figure 7 - Emissions des PM_{2,5} en fonction des secteurs
Source : Service public de Wallonie & Agence Wallonne de l'Air et du Climat, 2019

III.6.2. Phénomène de canyon

Le concept de rue canyon est inspiré des canyons naturels correspondant à un passage encaissé entre 2 reliefs, le passage étant généralement le résultat de l'érosion des roches par un cours d'eau (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2015). En zone urbaine, les canyons sont formés par une architecture particulière telle que dans le cas de rue étroite bordée par des bâtiments d'une certaine hauteur de manière continue des 2 côtés (Figure XXa) (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2015; Vardoulakis et al., 2003). La géométrie particulière de ces rues sera décrite ultérieurement. Néanmoins, il est important d'indiquer que la présence de ce type de rues intervient dans le phénomène de dispersion atmosphérique (et donc des polluants) selon certaines conditions de vent (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2015). Lorsque les conditions sont réunies, il est généralement observé une stagnation des polluants à proximité du sol amenant à un facteur amplificateur de la pollution pouvant aller jusqu'à 5 par rapport à la concentration de polluants de fond (Vardoulakis et al., 2003).

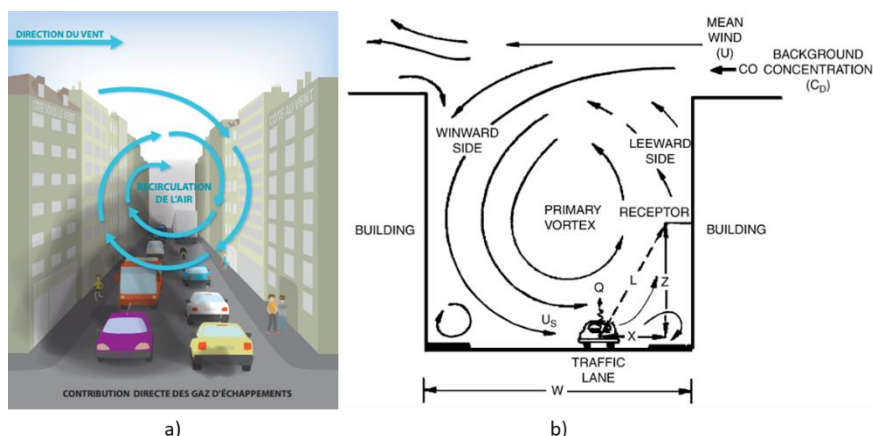


Figure 8 - a) Représentation d'une rue canyon

Source : ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2015

b) Courants de dispersion d'un polluant dans une rue canyon de type « Regular »

Source : Vardoulakis et al., 2003

III.6.3. Classification et types de rues canyons

Les caractéristiques d'une rue canyon peuvent être diverses en fonction des sources. Celles-ci s'accordent généralement sur un même concept généralisé qui repose sur une valeur caractéristique du rapport entre la hauteur (H) des bâtiments divisée par la largeur (l) de la rue (trottoir compris – noté H/l par la suite). Cette valeur du rapport est supérieure à 0,5 pour une rue sur plus de 100 mètres au cours desquels les bâtiments se succèdent de manière interrompue ou quasi-interrompue (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2015). L'effet de rue canyon le plus marqué serait lié à une valeur de rapport de l'ordre de 2 (Romain, 2019). Cependant, ce concept de rue canyon est un peu désuet puisqu'il a été observé des effets particuliers de dispersion atmosphérique et de répartition des polluants dans des conditions plus larges que celles faisant office de références pour une rue canyon (distance de 100m et rapport) (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g). En effet, aujourd'hui, le terme de rue canyon est appliqué plus largement aux environnements urbains et des distinctions sont effectuées selon divers facteurs. Par exemple, il existe des distinctions dans les dénominations lorsque le rapport hauteur des bâtiments divisé par la largeur des rues prend différentes valeurs :

- « Regular Canyon » lorsque le ratio prend une valeur aux alentours de 1 et qu'il n'y a pas d'ouvertures majeures dans les rangées de bâtiments constituant le mur du canyon (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g) ;
- « Avenue Canyon » lorsque le ratio prend une valeur inférieure à 0,5 (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g) ;
- « Deep Canyon » lorsque le ratio prend une valeur aux alentours de 2 (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g).

Avant d'aller plus loin dans la classification associée aux rues canyon, il est important d'apporter quelques définitions propres à cet agencement particulier (Figure XXb). Le vent synoptique correspond au vent « en haut » des bâtiments (représenté par U sur la Figure XXb). Le côté de la rue située en-dessous de l'origine du vent synoptique correspond au côté sous le vent de la rue (« leeward »). Le côté de la rue en face correspond au côté face au vent (« windward »). Les vents synoptiques s'orientent donc depuis la partie sous le vent vers la partie face au vent. Une portion de ces vents s'engouffre dans la rue canyon, tandis que l'autre partie conserve sa trajectoire au-dessus des bâtiments. Ces quelques

notions sont importantes pour la compréhension des concepts de canyon « step-up » et « step-down » qui seront abordés plus loin dans ce point.

Plus le rapport (H/L) prend une valeur élevée, plus l'accumulation de polluants sera importante (Burton, 2016). Des classifications plus larges peuvent être effectuées sur base notamment de la distance entre 2 intersections le long d'une rue canyon. Il faut alors se référer à un rapport de la hauteur des bâtiments sur la longueur de la rue (H/L) (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g). Sur base de ce critère, il existe 3 sous-classes :

- Des canyons courts lorsque le rapport (H/L) prend des valeurs de l'ordre de 3 (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g) ;
- Des canyons intermédiaires lorsque le rapport (H/L) prend des valeurs de l'ordre de 5 (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g) ;
- Des canyons longs lorsque le rapport (H/L) prend des valeurs de l'ordre de 7 (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g).

La distinction et les sous-classifications peuvent aller plus loin. Il sera ainsi distingué les canyons symétriques et les canyons asymétriques en fonction de si la hauteur est constante ou non le long du canyon (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g). Enfin, pour les canyons asymétriques, il existe 2 situations possibles si on intègre la direction du vent. En effet, le canyon peut être de type « step-up » lorsque la hauteur du bâtiment du côté de la rue sous le vent (leeward) est plus petite que la hauteur du bâtiment du côté face au vent (Vardoulakis et al., 2003; Wikipédia, 2020g). Inversement, il est possible de voir une situation opposée à celle qui vient d'être décrite, c'est-à-dire que la hauteur du bâtiment du côté face au vent est plus petite que la hauteur du bâtiment du côté de la rue sous le vent. On parlera alors de « step-down » canyons (Vardoulakis et al., 2003).

III.6.4. Conditions de vents

Le phénomène de rue canyon et la dispersion atmosphérique particulière qui en découle dépend des conditions de vents observées pour la zone. En effet, il a été identifié que l'accumulation de polluants a lieu lors de la formation d'un ou plusieurs vortex à l'intérieur de la rue. Pour qu'il y ait création de ce vortex, il est nécessaire d'avoir des conditions de vents particulières. Celles-ci doivent présenter une vitesse du vent synoptique supérieure à 2 m/s et un angle entre l'axe de la rue et le vent incident supérieur à 30° (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004; Vardoulakis et al., 2003). Lorsque le vent est quasi parallèle à l'axe de la rue ou qu'il est de très faible intensité, il n'y a pas formation de vortex et les polluants se répartissent en théorie de manière uniforme le long de la rue (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004).

Il s'en suit une dynamique de la dispersion des polluants émis par des véhicules dans une rue canyon dans laquelle s'est développé un vortex que l'on peut décomposer en plusieurs phases selon un cas idéalisé. Dans un premier temps, les polluants émis au niveau du sol sont entraînés dans un mouvement de recirculation et sont poussés vers le côté de la rue sous le vent. Une partie peut ensuite s'échapper vers l'extérieur en étant entraînée par les vents synoptiques. Cette partie évacuée va contribuer à la concentration de fond en milieu urbain. Dans cette dynamique, une partie des polluants reste coincée dans la rue canyon (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004).

Dans l'étude des rues canyon et de la dynamique de l'écoulement et de la dispersion des polluants et les tests réalisés en laboratoire, il a été observé 3 régimes d'écoulement possibles qui se développent à l'intérieur d'un canyon en fonction de la géométrie de la rue ainsi que des conditions de vent correspondantes (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004) :

- « Isolated roughness flow » : formation de 2 vortex indépendants de chaque côté de la rue. Celle-ci doit être suffisamment large pour que ça soit possible ($H/L < 0,2$) (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004) ;
- « Skimming flow » : formation d'1 vortex dans une rue très étroite ($H/L > 0,65$) qui interagit surtout à l'intérieur de la rue et peu d'échanges avec l'extérieur (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004) ;
- « Wake interference flow » : situation intermédiaire aux 2 régimes énoncés auparavant. La rue présente les caractéristiques suivantes : $0,2 < H/L < 0,65$. L'écoulement est complexe car il y a plusieurs structures tourbillonnaires qui peuvent interagir (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004).

Ces régimes sont présentés d'une manière schématique à la Figure 9.

En a) est présenté le régime « Isolated roughness flow », en b) le régime « Wake interface flow » et en c) le régime « Skimming flow ».

Pour observer ces régimes, il est nécessaire que les vents synoptiques soient bien perpendiculaires à la rue canyon.

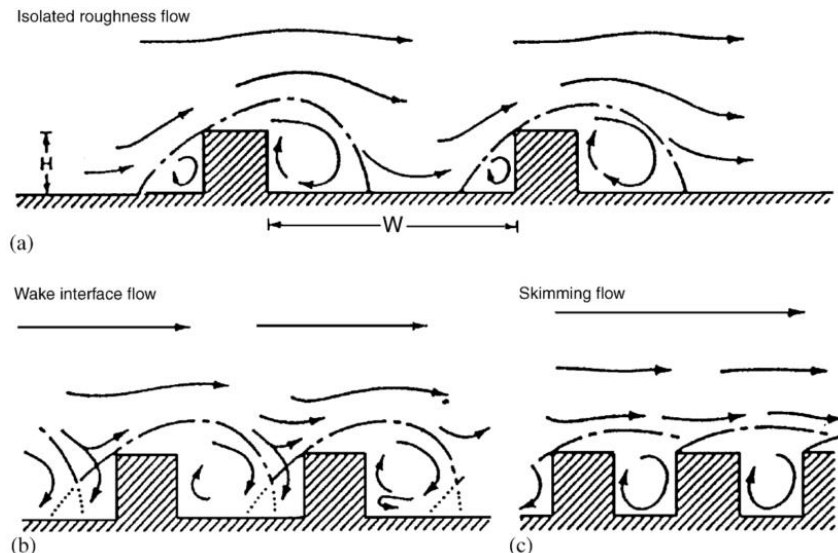


Figure 9 - Régimes potentiels observables lorsque les vents synoptiques sont perpendiculaires à la rue canyon
Source : Vardoulakis et al., 2003

III.6.5. Effets des rues canyon

L'effet canyon a des impacts considérables sur la dispersion atmosphérique des polluants (et leur accumulation), on parle donc de la qualité de l'air. Cependant, celui-ci présente des effets aussi sur la température, la vitesse du vent et la direction du vent.

Concernant la température, il est observé une augmentation de celle-ci de 2 à 4°C en fonction de la géométrie de la rue en question (Kiprop, 2017). Ce phénomène prend le nom d'îlot de chaleur urbain (Wikipédia, 2020g).

Les effets des rues canyon sur le vent varient en fonction du type de vent qui caractérise la zone. En effet, si le vent est parallèle à la rue canyon, il est observé une forme d'accélération du vent à l'intérieur de la rue. Si par contre le vent est perpendiculaire, il est observé la mise en place des différents régimes d'écoulement avec la formation de certains vortex (Wikipédia, 2020g). Les conditions de vent « naturelles » se voient donc modifiées par les constructions urbaines.

III.6.6. Modèles en Belgique et difficultés de mise en œuvre

Une étude a été réalisée pour évaluer la performance des modèles de qualité de l'air pour les concentrations de NO₂ en 2017 en Belgique. Il est indiqué dans le cadre de cette étude que l'effet de rue canyon n'est toujours pas appliqué dans les modèles à l'échelle de la Belgique. En effet, la Belgique, la Wallonie et Bruxelles utilisent le modèle RIO-IFDM qui ne prend pas en compte l'effet lié aux rues canyons. Seule la Flandre utilise le modèle ATMO-Street qui combine à la fois le modèle RIO-IFDM et un module appelé OSPM permettant la prise en compte de l'effet de rue canyon. Il est prévu que ce modèle combiné soit d'application à partir de 2020 en Wallonie (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2017).

L'intégration du concept de rue canyon dans un modèle est donc très récent pour la Belgique mais aussi très complexe puisqu'il nécessite de prendre en compte une multitude de paramètres plus ou moins importants repris dans le tableau situé en Annexe 8. Les paramètres sont décrits de manière synthétique et il est fait mention du degré d'importance dudit paramètre au sein des modèles. Les différents paramètres ne seront pas largement décrits dans le cadre de ce travail, ceux-ci permettent juste au lecteur de se rendre compte de la complexité de mettre en place un modèle représentatif de la réalité et qui intègre l'ensemble de ces paramètres. Il faut comprendre ici que le terme de rue canyon est utilisé plus largement qu'auparavant, comme ça a été mentionné auparavant, et que tout environnement urbain peut être caractérisé par des effets canyon plus ou moins marqués en fonction des paramètres qui caractérisent cet effet.

III.7. Législation

Les teneurs en particules pour les fractions PM_{10} et $PM_{2,5}$ sont réglementées par la Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 qui a été traduite en termes de droit wallon dans l'arrêté du Gouvernement wallon du 15/07/2010. Les valeurs limites définies tiennent compte de la santé mais aussi de l'aspect économique et de la faisabilité (AWAC & ISSeP, 2017).

Les valeurs limites concernant la fraction PM_{10} sont indiquées soit en moyenne journalière soit en moyenne annuelle. La valeur limite fixée en tant que maximum de moyenne journalière ne peut être dépassée que 3 jours par an. Concernant les $PM_{2,5}$ il existe 2 approches distinctes. La première correspond à des valeurs annuelles à ne pas dépasser. La seconde repose sur un indicateur d'exposition appelé IEM pour Indicateur d'Exposition Moyenne (AEI en anglais pour Average Exposition Index). Cet indicateur s'exprime en $\mu g/m^3$ et est déterminé sur base de mesures effectuées dans des lieux considérés comme caractérisant la pollution de fond urbaine (AWAC & ISSeP, 2017). Aucune limite journalière n'est fixée par la directive mais une concentration maximale est recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé. En effet, l'OMS préconise des valeurs guides pour les PM_{10} et les $PM_{2,5}$.

En ce qui concerne les particules ultrafines, aucune valeur limite n'est fixée par la Directive 2008/50/CE ni recommandée par l'OMS (Riffault, 2019).

En ce qui concerne le carbone noir (« Black Carbon »), l'OMS indique seulement qu'il est nécessaire de réaliser des études sur le carbone seul et quand il est associé à d'autres polluants. La Directive 2008/50/CE n'indique pas non plus de valeurs limites à respecter (AWAC & ISSeP, 2017; World Health Organization, 2006).

Les valeurs limites tant sur le plan législatif que celles basées sur les recommandations de l'OMS sont reprises dans le *Tableau 3*. Lorsqu'il s'agit de recommandations, l'acronyme AQG pour « Air Quality Guideline » est indiqué.

| Pollutant | Averaging period | Standard type and concentration | Comments |
|------------|------------------|---|---|
| PM_{10} | 1 day | EU limit value: 50 $\mu g/m^3$ | Not to be exceeded on more than 35 days per year |
| | | WHO AQG: 50 $\mu g/m^3$ | 99th percentile (3 days per year) |
| | Calendar year | Limit value: 40 $\mu g/m^3$ | |
| | | WHO AQG: 20 $\mu g/m^3$ | |
| $PM_{2,5}$ | 1 day | WHO AQG: 25 $\mu g/m^3$ | 99th percentile (3 days per year) |
| | Calendar year | EU limit value: 25 $\mu g/m^3$ | |
| | | EU exposure concentration obligation: 20 $\mu g/m^3$ | Average exposure indicator (AEI) ^(*) in 2015 (2013-2015 average) |
| | | EU national exposure reduction target: 0-20 % reduction in exposure | AEI ^(*) in 2020, the percentage reduction depends on the initial AEI |
| | | WHO AQG: 10 $\mu g/m^3$ | |

*Tableau 3 - Valeurs limites de la Directive 2008/50/CE et recommandations de l'OMS pour les PM_{10} et les $PM_{2,5}$.
Source : European Environment Agency, 2019a*

Il n'y a aucune recherche qui a permis de mettre en évidence une concentration à laquelle il n'y a pas d'effets indésirables liés aux PMs. Les valeurs mentionnées dans les lignes directrices de l'OMS ne constituent donc pas une protection sanitaire totale (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020c).

III.8. Techniques de mesure

III.8.1. La gravimétrie

Il s'agit de la méthode de référence au niveau européen qui repose sur la norme EN 12341:2014. Celle-ci consiste à aspirer un échantillon au travers d'une tête d'échantillonnage permettant de sélectionner le diamètre maximum aspiré, il est ainsi possible de sélectionner la fraction correspondant aux PM_{10} ou aux $PM_{2.5}$ qui est déposée sur un filtre. L'intérêt est d'avoir mesuré le filtre avant la déposition des particules et de déterminer ainsi la masse de particules correspondant à l'échantillon aspiré. Il suffit ensuite de déterminer la concentration correspondante à l'échantillon d'air en divisant la masse résultante par le volume d'air aspiré (AWAC & ISSeP, 2012; Part'aera, 2020).

Bien que cette méthode soit la méthode référente, elle présente de gros inconvénients, notamment l'impossibilité d'avoir accès aux résultats en temps réel, mais aussi une logistique coûteuse puisqu'elle nécessite des déplacements pour l'analyse des filtres ainsi que la mise en place sur site. La directive européenne 2008/50/CE qui fixe la méthode de référence a tenu compte des inconvénients de celle-ci et autorise la mise en place de méthodes alternatives permettant l'obtention de données en temps réel à condition que le pays démontre que ces méthodes alternatives sont équivalentes à la méthode par gravimétrie (AWAC & ISSeP, 2012).

III.8.2. Moniteur Grimm EDM 180

Il a été mentionné dans le point précédent que des méthodes alternatives peuvent être mises en place pour obtenir des données en temps réel. Dans le réseau wallon, ce sont les moniteurs Grimm EDM 180 qui correspondent à ces méthodes alternatives. Ceux-ci reposent sur le principe de la diffraction laser qui compte les particules selon leur taille et qui applique un algorithme permettant de transformer les comptages en masse.

Sur la *Figure 10a*) est représenté l'aspect extérieur de l'instrument et la *Figure 10b*) représente le principe de mesure de celui-ci. Un échantillon d'air est aspiré avec un débit d'1,2 litre par minute et est directement introduit dans la cellule de mesure. Celle-ci est en réalité une cellule de mesure spectrométrique qui a été conçue de manière à détecter chaque particule individuellement. Les particules sont donc envoyées une par une (permettant de compter chaque particule individuellement) sur un faisceau laser qui subit une diffraction plus ou moins importante en fonction de la taille des particules. Il s'en suit une classification des particules dans 31 canaux correspondant à une taille bien précise. Cette classification permet de déterminer la masse des particules des différentes fractions à l'aide d'une multiplication réalisée par les facteurs de densité correspondant. Cette conversion se fait de manière automatique dans la conception de l'instrument (GRIMM, 2011).

L'air ambiant présente généralement une humidité importante qui peut interférer dans le processus de diffraction du laser notamment en raison des gouttelettes d'eau qui caractérisent un air d'une humidité relative importante. Pour minimiser cet effet de nombreux instruments sont chauffés. Cependant, le chauffage de l'appareil conduit aussi à l'évaporation de composés semi-volatiles avant que ceux-ci soient mesurés. Il existe donc une alternative que le GRIMM possède. Il s'agit soit d'extraire l'humidité à l'aide d'air sec ou encore d'utiliser des tubes Nafion (encore appelé cartouche déshydratante type Nafion).

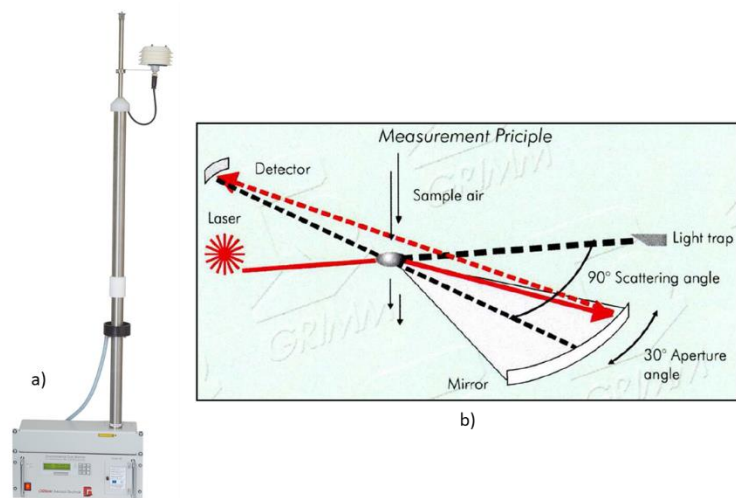


Figure 10 - a) Aspect extérieur de l'instrument type GRIMM EDM 180
b) Principe de mesure de l'appareil GRIMM EDM 180
Source : GRIMM, 2011

III.8.3. L'analyseur de particules de type BAM

L'analyseur de particules de type BAM est aussi appelé analyseur à atténuation béta. Cet appareil fonctionne en 2 phases, la première consiste à prélever les particules sur une bande filtrante et la seconde à mesurer la masse de ces particules. La mesure de masse s'effectue à l'aide d'une source interne de rayonnements de type béta (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020b). Cette procédure est effectuée en plusieurs étapes :

- 1) Un emplacement vierge de la bande filtrante est placé entre la source et le détecteur. Cette première mesure permet d'identifier un indice de référence (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020b);
- 2) Un nouvel emplacement est positionné et la buse s'abaisse sur la bande filtrante. Pendant un certain temps, de l'air chargé de particules est aspiré au travers la bande filtrante (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020b);
- 3) L'emplacement de la bande à travers lequel l'air a été aspiré est placé entre la source de rayonnements béta et le détecteur. Un indice I est mesuré (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020b);
- 4) Calcul de la concentration en particules à l'aide du volume aspiré et des indices mesurés (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020b).

Pour effectuer la mesure de $PM_{2,5}$ il faut que l'air passe au préalable dans une tête de prélèvement sélectionnant la fraction d'intérêt. Cet appareil en plus d'être fiable est réputé simple d'utilisation et d'entretien (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020b).

III.8.4. L'analyseur de particules de type TEOM-FDMS

Un autre instrument permettant la mesure de concentrations de particules fines est le TEOM-FDMS. TEOM correspond à Tapered Element Oscillating Microbalance (ou microbalance à élément conique oscillant) et FDMS pour Filter Dynamics Measurement System (ou système de filtration de mesures dynamique) (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020c).

Une tête de prélèvement sélectionne la fraction d'intérêt pour la mesure de la concentration. L'échantillon d'air prélevé est séparé en 2 parties, une partie est envoyée vers le FDMS et l'autre partie vers la pompe. Lorsque l'air entre dans le FDMS, il passe par une cartouche déshydratante et l'air en fin de FDMS est filtré de toutes ses impuretés (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020c; Bruxelles Environnement, 2012). La mesure s'effectue en 2 parties :

- 1) Mesure de la fraction non-volatile : l'air est introduit dans le TEOM et est chauffé à 30°C. L'air est filtré au travers de ce qui est appelé « filtre de collection » (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020c; Bruxelles Environnement, 2012);
- 2) Mesure de la fraction volatile : l'air passe dans le filtre de purge situé au niveau de la partie FDMS où il est refroidi à 4°C. Un air complètement filtré et donc sans particules est alors envoyé dans le TEOM (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020c; Bruxelles Environnement, 2012).

III.8.5. Mesure du contenu en carbone dans les aérosols

Dans la partie III.2, il a été fait mention des différentes méthodes pour mesurer le contenu en carbone dans les aérosols.

La première mesure consiste à mesurer la stabilité thermique du carbone. Pour ce faire, l'échantillon d'intérêt est repris sur un filtre et celui-ci suit 2 étapes :

- 1) La 1^{ère} étape s'effectue sous une atmosphère inerte (avec de l'hélium) et la partie organique du carbone contenu dans l'aérosol est vaporisée. Le flux d'hélium contient donc des composés organiques à base de carbone et passe dans un four où les composés organiques sont transformés en CO_2 . Le CO_2 produit est mesuré directement par infra-rouge ou indirectement après réduction en méthane par un convertisseur catalytique à l'aide d'un détecteur à ionisation de flamme (FID) (AWAC & ISSeP, 2012) ;
- 2) La 2^{ème} étape consiste à doser la partie inorganique du carbone. La combustion du carbone élémentaire est réalisée dans une ambiance contenant de l'oxygène et le CO_2 est mesuré (AWAC & ISSeP, 2012).

Lors de la 1^{ère} étape, il est possible qu'une partie du carbone inorganique se dégrade par pyrolyse et donne du carbone élémentaire. S'il y a pyrolyse, un noircissement du filtre est observé. Dès lors, il est nécessaire de surveiller l'évolution de la manipulation afin de déterminer cette partie perdue par pyrolyse. Le problème de cette méthode est qu'elle n'est pas standardisée (AWAC & ISSeP, 2012).

Une seconde méthode est privilégiée dans le réseau wallon et repose sur un instrument appelé l'aethalomètre. C'est à l'aide de celui-ci qu'est mesuré ce qui est appelé « Black carbon » en temps réel. Cet instrument réalise la mesure optique de l'absorption par les particules à une longueur de 880 nm (infra-rouge) qui est une longueur d'onde quantitative pour le carbone noir et indépendante de la présence d'autres composés dans l'aérosol. Il est possible d'associer d'autres longueurs d'onde à ces appareils afin d'identifier d'autres composants des particules (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2020a; AWAC & ISSeP, 2012).

III.8.6. Les micro-capteurs low-cost

Aujourd'hui, il existe un véritable essor et un développement industriel important dans ce qui est appelé « micro-capteur de pollution ». Ce développement s'inscrit dans un contexte où les citoyens sont de plus en plus mobilisés pour les nuisances environnementales. Il est donc développé des dispositifs de détection qui viennent compléter les méthodes de référence (Chevallier & Aleixo, 2018).

Ces micro-capteurs low-cost doivent respecter une série de conditions :

- Le prix du capteur doit être significativement inférieur aux instruments de référence (Chevallier & Aleixo, 2018);
- Le terme micro conduit à une réduction des dimensions, du poids et de l'encombrement des capteurs de manière à ce que ceux-ci soient manipulables par un individu seul (Chevallier & Aleixo, 2018);
- Le capteur doit agir comme une boîte noire, c'est-à-dire que l'information qu'il délivre est directement accessible soit directement à l'aide d'un moniteur soit à l'aide d'une interface logicielle (Chevallier & Aleixo, 2018).

Il existe une grande diversité de micro-capteurs en fonction du polluant d'intérêt. Les capteurs utilisés dans le cadre de ce travail sont des capteurs de particules. Ceux-ci reposent sur le principe de la diffraction de la lumière infrarouge (Figure 11), on les appelle des capteurs optiques (Chevallier & Aleixo, 2018).

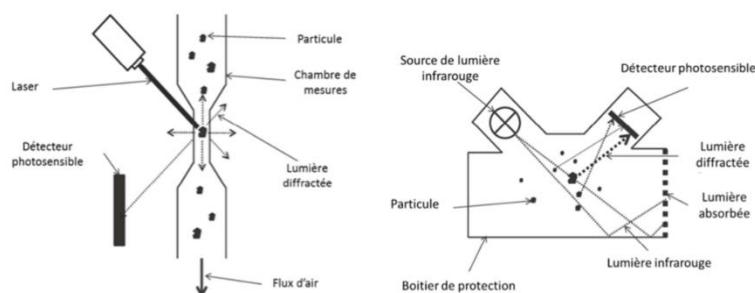


Figure 11 - Schéma de fonctionnement d'un micro-capteur de particules. Source : Chevallier & Aleixo, 2018

Lorsque les particules passent devant le faisceau laser, une partie de celui-ci est diffractée vers une photodiode. Il va se produire une figure de diffraction depuis laquelle il est possible de déterminer un nombre de particules dans l'échantillon d'air aspiré par le capteur qui sera ensuite traduit en concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Chevallier & Aleixo, 2018).

III.9. Santé et environnement

III.9.1. Santé

Il n'est plus nécessaire de démontrer que les particules en suspension ont un impact non négligeable sur la santé humaine. En effet, on estime qu'au niveau de la Belgique, pays d'une démographie approximative de 11 311 000 habitants, donc la concentration moyenne en $PM_{2,5}$ est de $12.7 \mu g/m^3$, il y aurait 7600 décès prématurés dus à ces particules en suspension. De manière élargie à l'Union Européenne en incluant le Royaume-Uni, le nombre de décès prématurés dus aux $PM_{2,5}$ s'élèverait à 374 000 (European Environment Agency, 2019b). Il est donc clair que les particules en suspension dont le diamètre est inférieur à $10 \mu m$ (PM_{10}) et d'autant plus la fraction la plus fine correspondant à un diamètre de $2,5 \mu m$ au maximum ($PM_{2,5}$) sont responsables d'une augmentation de la mortalité et de cas d'asthme parmi une série d'autres pathologies. De plus, il existe un lien entre le diamètre de la particule et sa dangerosité. En effet, plus celui-ci diminue, plus les particules constituent un risque majeur pour la santé humaine (Vardoulakis et al., 2003).

En réalité, la dangerosité des fines particules est liée au fait qu'au plus celles-ci sont de petite taille, au plus elles s'engouffrent loin dans le système pulmonaire de l'individu et atteignent ainsi les voies respiratoires inférieures tandis que les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2019) :

- Les particules dont le diamètre est supérieur à $10 \mu m$ sont filtrées par le système ciliaire du nez. Elles ne pénètrent pas dans l'appareil respiratoire mais il s'agit d'une absorption digestive. Les effets potentiels sont donc extra-pulmonaires (Kuske, 2019) ;
- Les particules dont le diamètre est compris entre $2,5$ et $10 \mu m$ atteignent la partie thoracique et se déposent au niveau de l'arbre pulmonaire. L'élimination de ces dernières se fait par la toux ou par filtration des cils de l'arbre. Il en résulte des effets localisés notamment au niveau de la trachée et des voies supérieures (Kuske, 2019) ;
- Les particules dont le diamètre est inférieur à $2,5 \mu m$ atteignent la partie alvéolaire et peuvent pénétrer dans le système sanguin. En plus de présenter des effets sur les parois comme des irritations, il peut se produire des effets sur certains organes tels que le foie, les reins, etc (Kuske, 2019) ;
- Enfin les particules dont le diamètre est inférieur à $1 \mu m$ peuvent passer la barrière alvéolo-capillaire et se retrouver elles aussi dans le sang. Elles sont suspectées d'être une cause de problèmes cardio-vasculaires mais peuvent aussi présenter des propriétés mutagènes et cancérogènes (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020d; Kuske, 2019).

Des effets sur la santé résultant de l'exposition aux particules sont d'autant plus marqués s'il s'agit de population considérée « à risques » telles que les personnes âgées, les enfants, des personnes présentant des pathologies cardiovasculaire ou respiratoire ou encore des personnes diabétiques (Kuske, 2019).

Parmi les effets sur la santé reconnus liés aux PMs, certaines particules interagissent avec les pollens et modifient leur structure afin de faciliter l'interaction avec l'organisme et ainsi accroître la sensibilité de l'individu face aux allergènes (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2019; Kuske, 2019).

L'exposition aux PMs se fait généralement de façon chronique. Cette exposition chronique s'accompagne de certains effets tels que :

- Accroissement des symptômes des voies respiratoires inférieures et des maladies respiratoires obstructives chroniques (type bronchopneumopathie) (Kuske, 2019) ;
- Réduction des fonctions pulmonaires (Kuske, 2019) ;
- Effets sur le développement du système immunitaire (Kuske, 2019) ;
- Potentiel lien avec la maladie d'Alzheimer (Kuske, 2019) ;
- Dommages du système nerveux central et du système reproducteur (Romain, 2019) ;
- Décès prématurés explicités ci-dessus.

En comparaison, les conséquences d'une exposition de courte durée se marque par :

- Des réactions inflammatoires des poumons et des symptômes respiratoires (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020d) ;

- Des effets néfastes sur le système cardiovasculaire (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020d) ;
- Accroissement de la prise de médicaments, hospitalisation et décès de personnes prédisposées (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020d).

Statistiquement au sein de l'Union Européenne, l'espérance de vie serait diminuée de 8 mois par les PM_{2,5} ce qui correspondraient annuellement à une perte totale de 3,6 millions d'années de vie (CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement), 2020d).

Enfin, il est démontré qu'une diminution des concentrations des PMs auxquelles sont exposées les citoyens conduiraient à une augmentation de l'espérance de vie et une réduction de l'incidence des maladies cardio-vasculaire et respiratoires (Kuske, 2019).

III.9.2. Environnement

Les polluants de l'air ayant le plus d'impact sur les écosystèmes européens sont l'ozone, l'ammoniac et les oxydes d'azote (NO_x) (European Environment Agency, 2019a). Néanmoins, les particules ont aussi des effets sur l'environnement. Parmi ceux-ci, puisque les particules proviennent notamment de la combustion de carburants, il est souvent observé des noircissements sur certains monuments ou certains bâtiments pouvant conduire jusqu'à la dégradation physique et chimique des matériaux qui les constituent (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2019; AWAC, n.d.).

Les particules peuvent également s'accumuler sur les feuilles des végétaux et entraver le processus de photosynthèse pouvant conduire à une réduction de la croissance végétale et la perturbation des écosystèmes (ATMO Bourgogne-Franche-Comté, 2019; Romain, 2019).

Les PMs ont une composition chimique très variable d'une particule à l'autre. Ainsi, il est observé que le « Black carbon » contribue au réchauffement climatique alors que d'autres constituants des PMs tels que le carbone organique, l'ion ammonium (NH₄⁺), l'ion sulfate (SO₄²⁻), l'ion nitrate (NO₃⁻) ont un effet refroidissant plutôt (European Environment Agency, 2019a).

IV. La qualité de l'air pendant le confinement

L'un des objectifs poursuivi ici est d'observer si le confinement imposé en raison de la pandémie de coronavirus a eu une influence sur les concentrations en $PM_{2,5}$ autour du site d'étude présenté plus loin.

Comme vu précédemment, en Région Wallonne, la majeure partie des émissions de particules provient du secteur résidentiel (chauffage), suivi du secteur industriel et enfin le secteur du transport et l'agriculture (AWAC & ISSeP, 2017). Mais comment la qualité de l'air a-t-elle évolué au cours de cette période de confinement ?

Un élément est certain, le confinement a conduit à une nette réduction du trafic. Les 3 premières semaines du confinement ont été marquées par une baisse de 98,5% par rapport au trafic dit normal et jusqu'à 99% pour Bruxelles et les distances de déplacement se sont vues réduites de 80%. Néanmoins, dès la réouverture des magasins de bricolage en date du 15 avril, le trafic est devenu à nouveau plus important et la réduction se chiffrait plutôt à une réduction de 77% (Binamé, 2020). Est-ce que cette réduction du trafic s'accompagne d'une amélioration de la qualité de l'air et donc d'une réduction des polluants ? Pour le savoir, une étude a été effectuée par Bruxelles Environnement.

Cette étape repose sur une série de caractéristiques :

- Les conditions météorologiques enregistrées pour la période de confinement ont été comparées à des données historiques de 2010 à 2019 (Bruxelles Environnement, 2020a) ;
- Les concentrations des polluants mesurées en confinement ont été comparées à l'historique des données de 2017 à 2019 (cette période ne correspond qu'à 3 années parce que Bruxelles Environnement affirme que l'amélioration continue en matière de qualité de l'air ne justifie pas d'intégrer des années auparavant) (Bruxelles Environnement, 2020a) ;
- Il existe une série de stations de natures diverses allant de stations urbaines sous influence forte du trafic routier à des stations urbaines sous faible influence du trafic routier. L'une des stations est sur site industriel avec une influence modérée du trafic (Bruxelles Environnement, 2020a) ;
- Les polluants mesurés sont les oxydes d'azote (NO et NO_2), les PM_{10} , les $PM_{2,5}$ et le black carbon (Bruxelles Environnement, 2020a) ;
- La période concernée par cette étude est du 19 mars au 19 avril 2020 mais une autre étude complémentaire à celle-ci parue le 6 mai 2020 a prolongé l'étude jusqu'au 3 mai 2020 et les conclusions sont identiques (Bruxelles Environnement, 2020b) ;

Les conditions météorologiques durant le confinement sont comparables aux conditions météorologiques historiques. Elles sont même légèrement meilleures pour la dispersion des polluants car la diffusion verticale est légèrement meilleure que celle dans les conditions historiques. Il faut cependant marquer que pour les particules fines, le confinement est marqué par une quasi-absence de précipitations ce qui est synonyme de phénomènes de remise en suspension (Bruxelles Environnement, 2020a).

Concernant les polluants, les oxydes d'azote sont marqués par une réduction conséquente de leur concentration. En moyenne, pour les sites fortement exposés au trafic, une réduction de 75% pour les concentrations en NO et 50% pour les concentrations en NO_2 est observée. Pour les sites moins exposés au trafic et les sites de fond urbains, la réduction est aussi observée mais de moindre importance. Les réductions pour les concentrations de black carbon suivent la même tendance que celles des oxydes d'azote (Bruxelles Environnement, 2020a).

Cependant, pour les particules, c'est tout à fait différent. En effet, les concentrations semblent même légèrement plus élevées que dans les conditions historiques. Cette situation s'explique par le fait que les particules fines présentent une grande diversité de sources naturelles et anthropiques alors que les oxydes d'azote et le black carbon sont fortement reliés au transport. De plus, comme mentionné auparavant, les conditions météorologiques sont propices à la remise en suspension des particules. La période de mesure correspond à la période au cours de laquelle l'activité agricole est la plus intense, la part de particules secondes formées par les activités agricoles peut dès lors être importante. Enfin, les particules fines peuvent parcourir de longues distances si les conditions météorologiques sont favorables. Il est donc possible que les particules mesurées dans le cadre de cette étude proviennent d'endroits éloignés pas encore ou peu atteints par la pandémie (Bruxelles Environnement, 2020a).

Pour compléter ces informations, la *Figure 12* indique les concentrations en PM_{10} et en $PM_{2,5}$ mesurées pour les différentes stations utilisées dans le cadre de l'étude de Bruxelles Environnement :

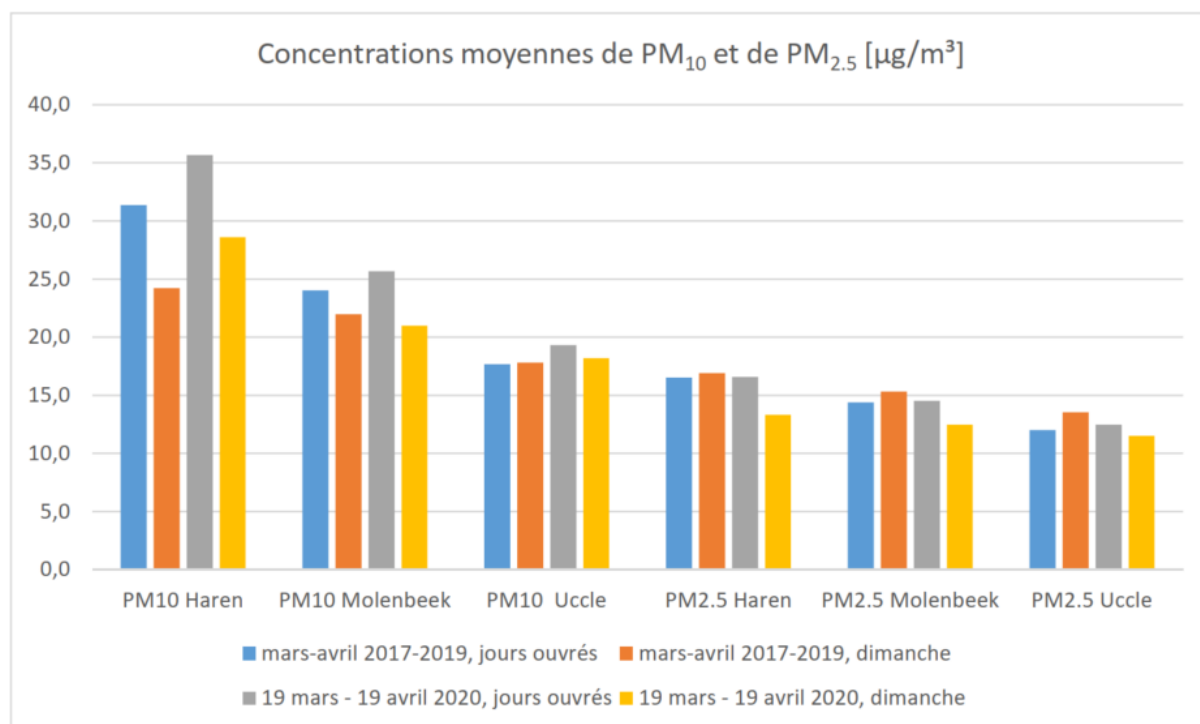


Figure 12 - Concentrations en PM_{10} et $PM_{2,5}$ pour les différentes stations de Bruxelles dans le cadre de l'étude sur l'impact de la qualité de l'air en période de confinement
Source : Bruxelles Environnement, 2020a)

V. Site étudié

V.1. Description

Comme mentionné au préalable, l'année 2020 a été marquée par une pandémie de coronavirus. Cette situation particulière a conduit à une modification du sujet du présent travail. En effet, le sujet initial correspondait à l'étude de l'impact du trafic de dépose et de reprise scolaire sur la concentration en $PM_{2,5}$ aux différentes entrées d'une école. Il a donc été nécessaire d'effectuer des rencontres, des échanges de mails et des conversations téléphoniques afin d'obtenir les autorisations de l'établissement, mais aussi des forces de l'ordre pour effectuer une étude aux abords de l'institution. Suite à la réorientation du sujet à cause de la pandémie, le site étudié est resté le même afin d'éviter une nouvelle procédure d'acquisition d'autorisations pour mener la campagne de mesures nécessaires.

Le site d'intérêt dans le cadre de ce travail correspond à une école (Institut Notre-Dame d'Arlon) assurant la scolarité depuis la maternelle jusqu'aux secondaires. Cet établissement se situe légèrement au sud du centre-ville de la ville d'Arlon, à proximité du commissariat de police d'Arlon.

Avant de décrire plus largement la localisation de notre site d'étude, il est intéressant de présenter brièvement Arlon qui accueille l'établissement scolaire dont il est question. En effet, Arlon est la ville correspondante au chef-lieu de la province de Luxembourg, elle est la ville principale de la commune plus largement appelée commune d'Arlon.

La commune d'Arlon présente plus de 30000 habitants et la ville plus de 16000 citoyens. Elle représente un milieu urbain par rapport aux autres localités voisines, sans pour autant atteindre les dimensions de grandes villes. Il s'agit d'un milieu urbain entouré de zones à caractère fortement rural (Wikipédia, 2020a).

La commune est idéalement située à proximité du Grand-Duché de Luxembourg. Elle est notamment délimitée à l'est par la frontière luxembourgeoise (Wikipédia, 2020a). Cette situation à proximité du Grand-Duché de Luxembourg permet une plus large gamme d'emploi dite « de frontaliers ». Ceux-ci se rendent à leur travail soit via des bus organisés par l'état luxembourgeois, soit de manière individuelle avec leur voiture, soit par le train en gare d'Arlon. Il existe donc une mobilité importante liée à la géolocalisation idéale de la commune aux moments de départ et de retour au travail.

V.2. Climat

Le climat belge est de type tempéré, caractérisé par des étés relativement frais et humides et des hivers doux et pluvieux (Institut Royal Météorologique belge, 2020). On peut préciser le type jusqu'à « tempéré océanique », précisant qu'il s'agit d'une zone située entre le climat polaire et le climat subtropical. Il est fortement influencé par la présence de la mer et est caractérisé par une forte inertie atténuant les extrêmes climatiques (climat.be, 2020). Les précipitations en Belgique présentent une moyenne de 74 mm même si la Belgique est marquée parfois par certaines fortes pluies dépassant de manière conséquente cette moyenne (Institut Royal Météorologique belge, 2020).

Afin de mieux se rendre compte de la situation, l'Institut Royal Météorologique belge a réalisé une série de statistiques sur le climat en Belgique. En Figure 13, un diagramme ombrothermique fait état de la situation à Arlon en intégrant l'information depuis 1981 jusqu'à 2010 :

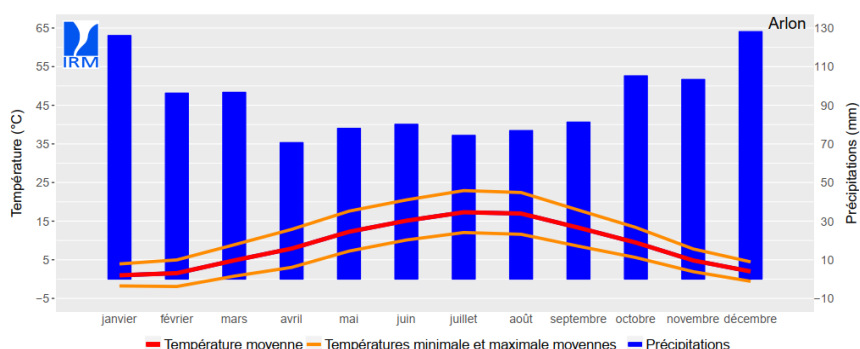
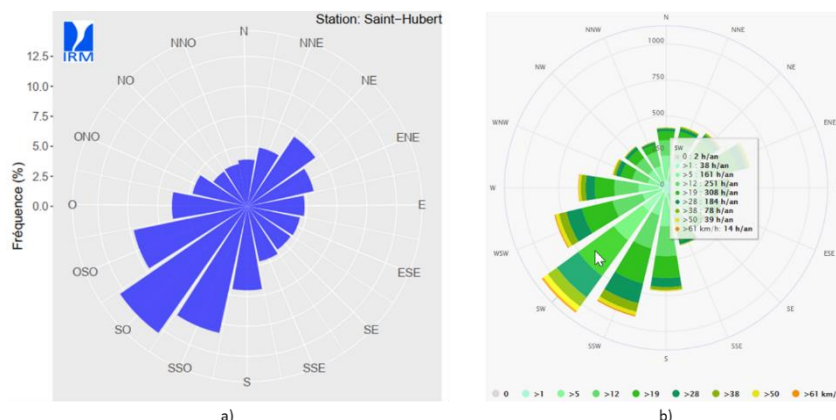


Figure 13 – Diagramme ombrothermique caractérisant Arlon obtenu à l'aide des données historiques de 1981 à 2010.

Source : Institut Royal Météorologique belge, 2018

On y observe d'un point de vue statistique des précipitations plus importantes (94,65 mm) à Arlon que dans le reste de la Belgique (Institut Royal Météorologique belge, 2018). On retrouve encore une multitude de données dans ce rapport de 2018 de l'Institut Royal Météorologique belge comme le rayonnement solaire et la durée d'insolation, le nombre de jours moyen d'orage, etc. Ces informations, bien qu'intéressantes, ne feront pas l'objet d'une présentation dans ce travail. Néanmoins, puisqu'il s'agit d'un cas d'étude lié à la dispersion atmosphérique, il est intéressant de présenter une rose des vents caractérisant la situation d'Arlon. Il n'existe cependant pas de station publique mesurant la vitesse et l'orientation du vent. Le rapport de l'Institut Royal Météorologique belge renvoie à la station de Saint-Hubert pour caractériser les vents d'Arlon. Saint-Hubert est une ville située dans la province de Luxembourg à une cinquantaine de km au nord-ouest de la ville d'Arlon. Il est aussi possible d'obtenir une rose des vents d'Arlon à l'aide de modèles météorologiques calculés sur base historique. C'est notamment ce qui est proposé par le site internet : Meteoblue. Ce dernier propose une série de données calculées sur base de leur propre modèle météorologique (NEMS). Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets météorologiques locaux tels que les îlots de chaleur, les courants d'air froid, les tempêtes ou les ouragans (meteoblue, 2020).

Deux roses des vents sont présentées à la Figure 14. La première rose des vents (Figure 14a) est obtenue à l'aide des mesures réalisées sur la période de 1981 à 2010 à Saint-Hubert par l'Institut Royal Météorologique belge. Ces mesures sont reprises dans un rapport statistique destiné à la région d'Arlon. La seconde (Figure 14b) est le résultat de données calculées sur base du modèle météorologique issu de Meteoblue (Institut Royal Météorologique belge, 2018; meteoblue, 2020). La rose des vents de Meteoblue



On peut voir que les roses de vent indiquent sensiblement la même information et ce, peu importe que l'information provienne de mesure à 50 km d'Arlon ou que celle-ci soit obtenue à l'aide de calculs reposant sur un modèle météorologique. Les vents proviennent donc essentiellement du sud-ouest et soufflent vers le nord-est et suivent donc la même tendance que Les vents dominants caractérisant la Belgique. Arlon n'est donc pas un cas particulier à l'échelle de la Belgique.

Les vents sont majoritairement de faible vitesse caractérisant la situation en Belgique. Une particularité est néanmoins visible pour le mois de mai dont l'orientation des vents est du nord-est vers le sud-ouest.

Dans le cadre de ce travail, des données météo localisées pour Arlon ont pu être obtenues. La description de la station en particulier sera effectuée dans la partie VI.1.3. Il s'agit de données horaires allant du 15 mars 20h00 au 2 juin 10h00 qui ont permis de dresser une rose des vents différente (*Figure 15*). Comme il est indiqué dans la partie VI.1.3, les données obtenues à l'aide de cette station sont entourées de questionnements qui n'ont pas trouvé de réponses. En effet, aucune information n'a été obtenue concernant la méthode d'enregistrement de la direction des vents par les capteurs constituant la station. Est-ce que ceux-ci enregistrent la direction du vent ou leur origine ? Cette rose des vents suscite une série de questionnements et elle semble « inversée » par rapport à celles obtenues à l'aide du rapport de l'Institut Royal Meteorologique belge ou avec le modèle NEMS de meteoblue.

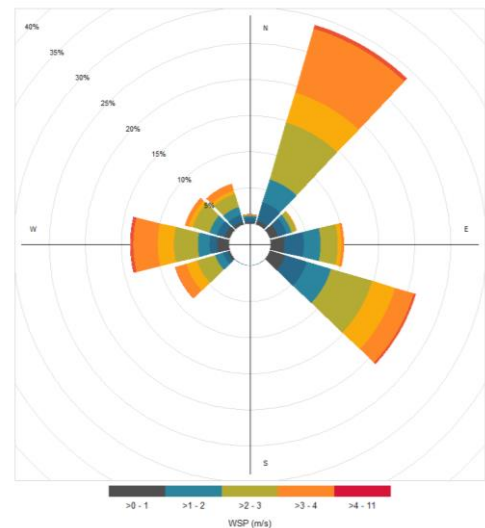


Figure 15 - Rose des vents réalisées à l'aide des données de la station météo d'Arlon.

V.3. Localisation

L'Institut Notre-Dame d'Arlon (représenté en jaune sur la *Figure 16* est un établissement scolaire assurant l'enseignement maternel, primaire et secondaire. Il s'agit donc d'un bâtiment ou d'une série de bâtiments relativement considérable qui s'étend sur plusieurs rues et qui présente plusieurs entrées.

- L'école secondaire présente 2 entrées, une secondaire à l'Avenue Victor Tesch et la principale à la rue Joseph Netzer ;
- L'école primaire présente son entrée principale à la rue du Casino. C'est aussi l'entrée pour la garderie ;
- L'école maternelle est implantée au niveau de l'Avenue Victor Tesch.

Les rues sont représentées par des numéros sur la *Figure 16* :

- 1) La rue Joseph Netzer est reliée à la place Léopold qui est une place de stationnement pour accéder au centre-ville d'Arlon. Elle est surplombée par le Parc Léopold et se poursuit au-delà de l'intersection avec la rue du Casino. C'est dans cette rue que se situe l'entrée principale du commissariat de la police d'Arlon. Un arrêt de bus se trouve à proximité de l'entrée secondaire. Celui-ci sera dénommé arrêt de bus « INDA » dans la suite de ce travail. Il n'y a que 2 places de parking devant l'INDA. La rue Joseph Netzer est une rue à sens unique menant de la place Léopold vers le commissariat de la police d'Arlon. Durant la période d'étude, un chantier de construction occupe la position 1 représentée à la *Figure 16*. A de nombreuses reprises durant la pose et la reprise des capteurs, le chantier reçoit des livraisons de camion dont le moteur tourne en permanence tout le temps de la livraison. Le camion occupe alors les 2 places de parking de l'INDA et son déchargement se réalise à l'aide d'une grue installée sur le chantier. Les moments d'activité et d'inactivité du chantier sont repris dans le tableau de bord réalisé à l'aide des notes effectuées lors de chaque pose et chaque reprise des capteurs.

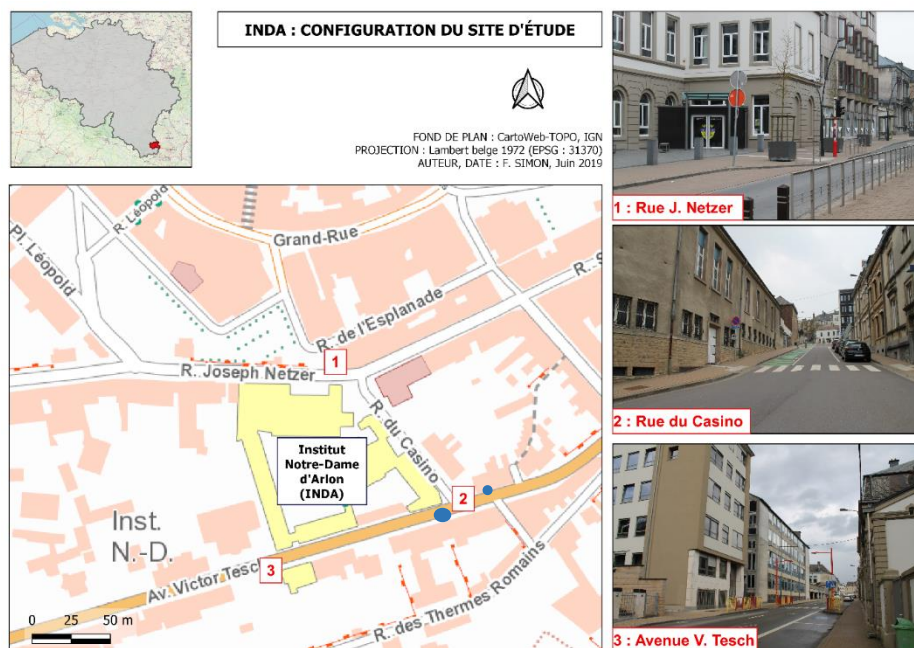


Figure 16 - Configuration du site d'étude. Source : Simon, 2019

- 2) La rue du Casino est une rue descendante vers le sud. Elle relie la rue Joseph Netzer et l'Avenue Victor Tesch. Il s'agit d'une rue à sens unique depuis l'Avenue Victor Tesch vers la rue Joseph Netzer. Elle présente 2 types de places de parking. Toute la partie droite de la rue est organisée sous le format de places de parking permanentes alors que la partie de gauche est organisée sous format « Kiss & Ride », c'est-à-dire que ces places servent uniquement à la dépose et à la reprise de passagers (en l'occurrence les écoliers) mais il ne s'agit en aucun cas de places permanentes. Néanmoins, en dehors des périodes scolaires, les places « Kiss & Ride » semblent être utilisées comme des places permanentes par les citoyens. Le trafic de cette rue est essentiellement lié à la fréquentation scolaire mais aussi par les autorités de l'ordre car la rue du Casino donne accès au parking du commissariat de police.
- 3) Enfin, l'Avenue Victor Tesch est une rue présentant un trafic relativement important. Elle conduit à la gare d'Arlon et est une rue à double sens à contrario des 2 rues précédentes. Il est possible de se garer à une multitude d'endroits dans cette rue. Deux chantiers ont été réalisés à l'Avenue Victor Tesch durant la période d'étude. Ceux-ci sont représentés par des points bleus autour du chiffre 2 de la Figure 16. Le premier, situé vers l'ouest a débuté le 08 mai. Lors du retour pour la pose de capteurs le 12 mai, il était presque terminé et la fin a officiellement eu lieu le 13 mai. Ensuite, vers l'est, un autre chantier a débuté le 18 mai avec la mise en place d'un échafaudage avec pour objectif des travaux sur la toiture d'une maison située presque en face de la rue du Casino. Celui-ci était encore actif à la fin de la période des mesures.

Comme indiqué dans l'échange de mails lié à l'Annexe 4, lorsque le confinement a été annoncé et donc la suspension des cours scolaires, les transports en commun de type bus ont vu leur service être réduit. Ils sont passés en horaire de vacances. A défaut de contacts directs avec les représentants du TEC, il n'a pas été possible de déterminer un pourcentage de bus en période de vacances par rapport au fonctionnement à plein régime.

Dans ce mail, le conseiller en Mobilité, Monsieur Thibault VINCENT, précise qu'avec les travaux qui ont lieu à la rue des Déportés, les bus provenant de la gare se dirigeant vers la rue des Déportés sont réorientés depuis la gare vers l'Avenue Jean-Baptiste Nothomb puis la rue Joseph Netzer, le carrefour du Liedel et enfin la rue Sonnetty. Cette déviation conduit à une augmentation de la quantité de bus passant par la rue Joseph Netzer durant la durée des travaux prestés à la rue des Déportés. A l'aide des notes prises lors de chaque pose et chaque reprise des capteurs autour de l'INDA, il a été relevé que les travaux à la rue des Déportés ont pris fin le 12 mai. La fin des travaux est synonyme de l'arrêt de la déviation mise en place pour les bus et théoriquement, il devrait être observé une augmentation du nombre de bus pour l'Avenue Victor Tesch et une diminution pour la rue Joseph Netzer.

V.4. Topographie

Le site est caractérisé par une topographie particulière qui mérite d'être mise en évidence. En effet, comme le montre la *Figure 17*, le site de l'INDA est en pente descendante depuis la rue Joseph Netzer vers l'Avenue Victor Tesch. Cette pente se caractérise par une valeur de 8,7% (Simon, 2019).

INDA : Relief

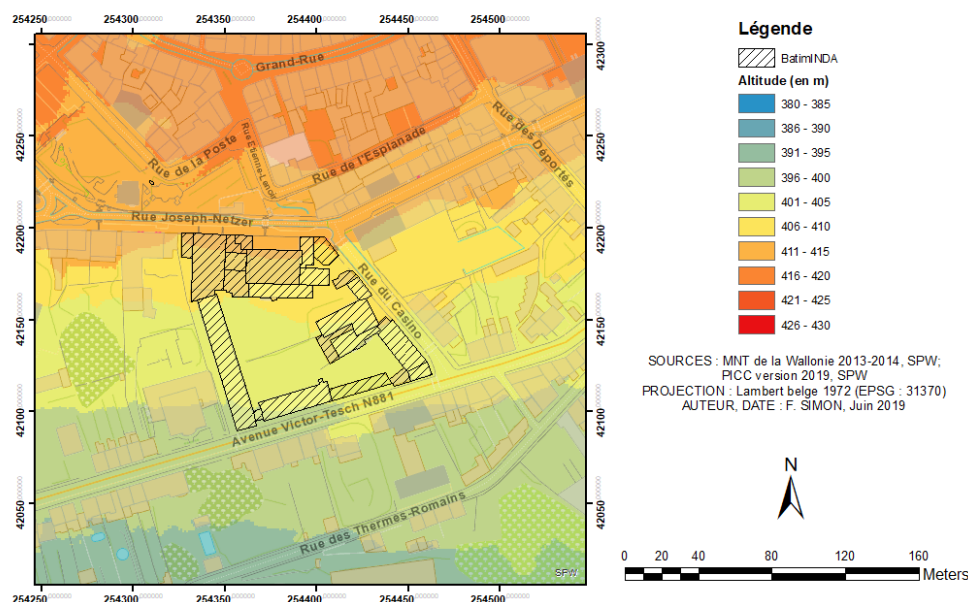


Figure 17 - Relief du site d'étude.
Source : Simon, 2019 et SPW Wallonie

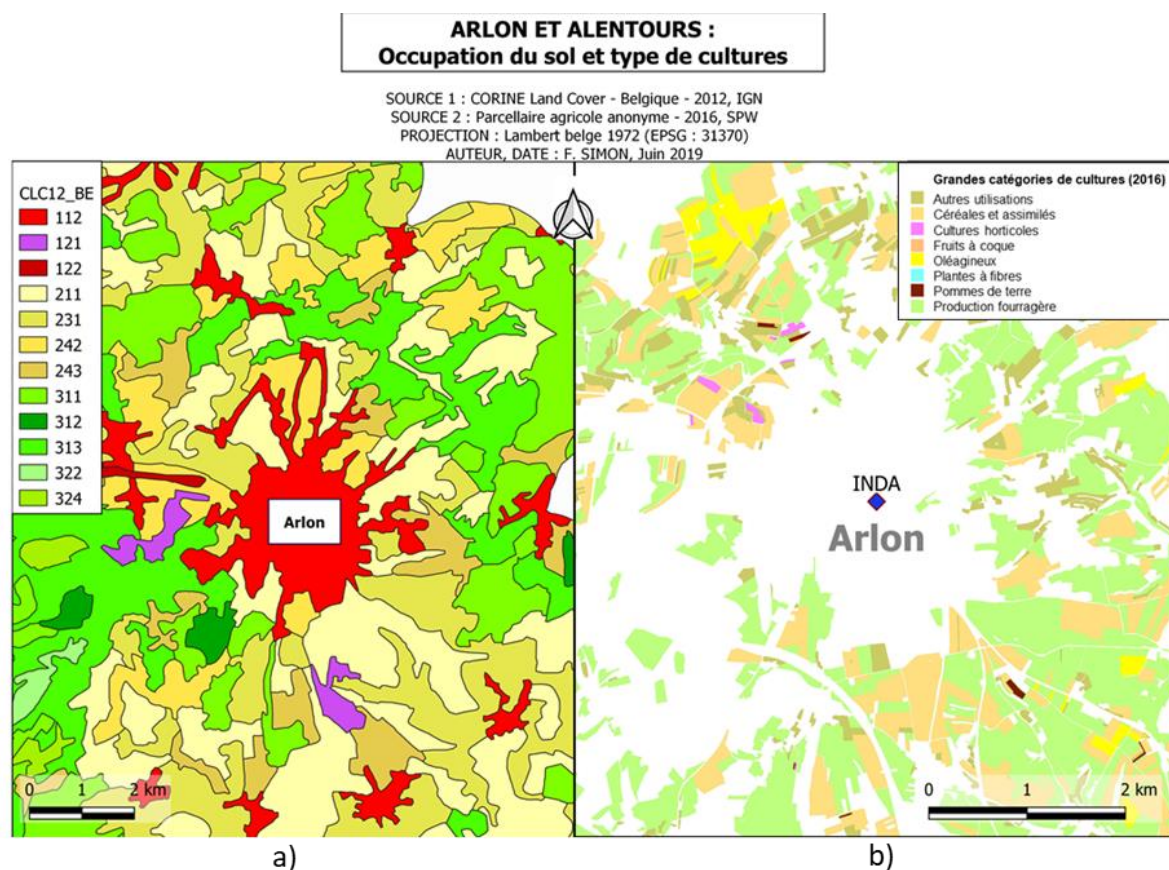
V.5. Occupation du sol

Cette partie du travail a pour objectif de mettre en évidence la présence ou l'absence de parcelles agricoles qui peuvent intervenir dans la formation de particules en suspension comme indiqué au préalable dans les particules en suspension d'origine agricole. La commune d'Arlon présente une superficie de 118,64 km² qui se répartit comme suit :

- Surface agricole : 45,93% ;
- Bois : 26,47% ;
- Terrains bâtis : 23,44% ;
- Divers : 4,17%.

Sur base des cartes d'aménagement du territoire de l'IGN (CORINE Land Cover, 2012) ainsi que celle provenant d'un parcellaire agricole anonyme, la situation d'Arlon est présentée en *Figure 18*.

Les zones directement adjacentes à la ville d'Arlon sont plutôt de type agricoles de diverses natures (*Figure 18a*). En s'éloignant de la ville, des zones boisées apparaissent de plus en plus et constituent la périphérie de la ville d'Arlon (*Figure 18b*). Il s'agit donc d'un agencement qui pourrait s'apparenter à une couronne constituée de parcelles agricoles, elle-même entourée de parcelles boisées. La conséquence d'un tel agencement est que, peu importe la direction des vents, il est probable d'observer la formation de particules secondaires suite aux rejets gazeux réalisés dans le cadre des activités agricoles.



| Code_CLC | Signification | Couleur |
|----------|--|---------|
| 112 | Tissu urbain discontinu | |
| 121 | Zones industrielles ou commerciales et installations publiques | |
| 122 | Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés | |
| 211 | Terres arables hors périmètres d'irrigation | |
| 231 | Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole | |
| 242 | Systèmes culturaux et parcellaires complexes | |
| 243 | Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants | |
| 311 | Forêts de feuillus | |
| 312 | Forêts de conifères | |
| 313 | Forêts mélangées | |
| 322 | Landes et broussailles | |
| 324 | Forêt et végétation arbustive en mutation | |

Figure 18 - Occupation du sol dans la région d'Arlon et légende des couches
Sources : Simon, 2019, IGN (CORINE Land Cover, 2012) et parcellaire agricole anonyme.

V.6. Géométrie urbaine – Les rues canyon

Il m'a été proposé dans le cadre de ce travail de réaliser un relevé approximatif des hauteurs des bâtiments pour les 3 rues correspondant à mon site d'étude en poussant les limites du relevé à une cinquantaine de mètres avant et après l'établissement scolaire. Pour ce faire, on réalisait l'hypothèse qu'un étage correspondrait à une hauteur de 3 mètres et le relevé se ferait soit de manière physique sur le site soit à l'aide de Google Maps qui permet d'accéder à des images StreetView. Cette approche a pour objectif d'identifier approximativement l'existence de rue canyon ou non. Cependant, il a été démontré que l'effet canyon aujourd'hui est appliqué beaucoup plus largement et dépend d'une multitude de paramètres. Bien que le rapport hauteur sur largeur constitue un paramètre indispensable pour comprendre la dispersion des polluants dans une rue canyon, il resterait une multitude d'autres paramètres à définir afin de comprendre la dispersion des polluants dans notre situation.

Il serait donc beaucoup plus intéressant de contacter le service de l'urbanisme d'Arlon et d'obtenir des informations détaillées concernant les constructions pour le site d'étude du présent travail, de réaliser une modélisation précise avec les outils numériques adéquats tenant compte des effets canyon et enfin de réaliser une série de simulations intégrant l'ensemble des paramètres impliqués dans la dispersion atmosphérique particulière dans le cas d'une rue canyon. Un relevé approximatif comme ça a été envisagé dans le cadre de ce travail n'apporterait que peu d'informations intéressantes ou du moins uniquement des informations à titre indicatif. Pour obtenir une idée de la disposition du site et de la présence de rues canyons, ce travail vous renvoie plutôt vers un travail réalisé auparavant mais qui ne tient pas compte des récents chantiers et constructions : « Simon, F. (2019). *Les particules PM_{2,5} : Influence du trafic de dépose scolaire sur la qualité de l'air d'une école Modélisation ENVI-MET et mesures à l'aide de capteurs "low cost."* Université de Liège, Arlon. ».

VI. Matériel et méthodes

VI.1. Matériel

VI.1.1. Instruments SAM – 3 capteurs PM2,5

Par souci de constance dans la suite du travail, il sera distingué le terme « Instrument » correspondant au boîtier représenté en *Figure 19 et 20*, du terme « Capteur » qui fait référence aux capteurs Honeywell servant à la mesure des PM_{2,5}. Chaque instrument contient 3 capteurs isolés les uns des autres et ces 3 capteurs vont permettre de prélever un échantillon d'air indépendamment du prélèvement par les autres capteurs grâce à leur séparation et au système « d'ouïes d'aspiration » mentionné en *Annexe 2* et représenté à la *Figure 19*. Les 3 capteurs d'un même instrument doivent donc théoriquement répondre au même moment avec une intensité similaire (puisque les échantillons d'air prélevés sont en réalité des répliqués) sauf circonstances exceptionnelles où l'un des capteurs est encrassé (par expérience, il a déjà été retrouvé des insectes à l'intérieur des capteurs Honeywell qui interféraient avec la mesure) ou alors l'un des capteurs ne réagit pas de la même manière que les autres sans pour autant qu'il soit encrassé, on parlera alors d'erreur du capteur. Il faudra être en mesure de réaliser les sélections adéquates pour tirer l'information pertinente des mesures malgré les éventuelles erreurs de capteur. Ce procédé de sélection et de réflexion sera présenté dans la partie VI.2.5.



Figure 19 - Photo des 3 ouïes d'aspiration de l'instrument

Maintenant que cette distinction a été réalisée, il est intéressant de décrire physiquement la constitution de ces boîtiers ainsi que leurs caractéristiques pour leur utilisation en pratique.

Les instruments contiennent (*Figure 20*) essentiellement :

- Une batterie et un régulateur de charge ;
- Un capteur Bosch BME280 permettant la mesure de la température, de l'humidité relative et de la pression atmosphérique ;
- Un système d'enregistrement sur une carte SD ;
- Une horloge interne qui nécessite un paramétrage au préalable via un terminal (ce fut l'un des problèmes de réglage pour lequel il a fallu réaliser un code de correction sur le logiciel Rstudio).

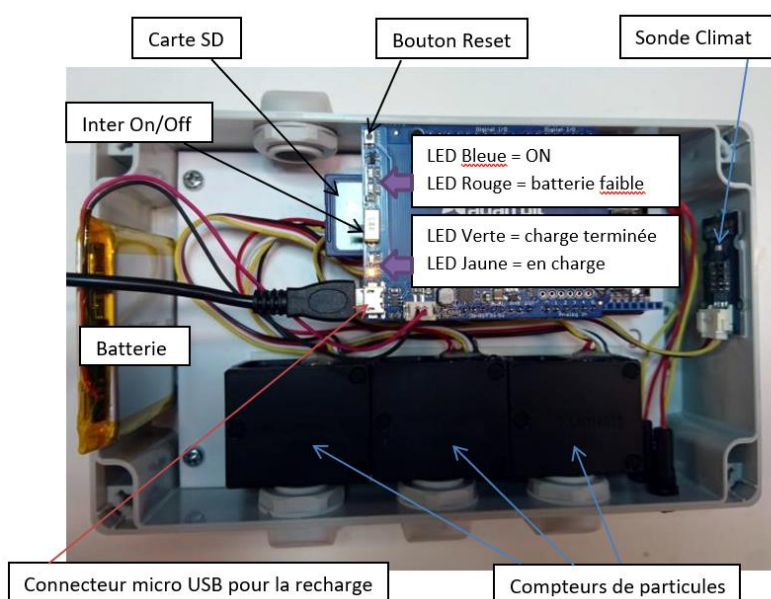


Figure 20 - Intérieur des instruments. Source : Annexe 2.

L'annexe 2 reprend les documents correspond aux détails concernant le fonctionnement des instruments prêtés par le SAM-ULiège (Sensing of Atmospheres and Monitoring) dans le cadre de ce travail.

Les boîtiers sont considérés étanches à condition que les « ouïes d'aspiration » soient bien situées avec les ouvertures vers le bas et que le couvercle et le joint d'étanchéité le constituant soient correctement placés. Néanmoins, les capteurs Honeywell qui sont placés au sein de l'instrument présentent une limite concernant l'humidité relative de l'environnement dans lequel ils réalisent leurs mesures. Cette limite sera décrite dans le point suivant de ce travail.

L'autonomie des instruments dépend d'un réglage qui doit être effectué avec la carte SD. En effet, la carte mémoire contient les paramètres de réglage comme par exemple l'intervalle entre 2 mesures (qui est ici de 60 secondes). Avant chaque mesure, le capteur doit être actif au minimum 30 secondes précédant la mesure. Dans notre cas, les capteurs prennent des mesures toutes les minutes (mesure instantanée) par conséquent, le capteur est éteint durant 30 secondes et se rallume 30 secondes avant la mesure et l'enregistrement sur la carte SD. Avec ces paramètres, les appareils présentent une autonomie au mieux d'une dizaine d'heures. Ces instruments sont relativement capricieux. Au cours des mesures, il est arrivé plusieurs fois que la charge soit très lente ou qu'elle ne se fasse tout simplement pas. En cause, le régulateur de charge utilisé dans l'instrument n'est pas de grande qualité, il s'agit de la pièce posant problème dans la majorité des cas. Il a d'ailleurs fallu remplacer un régulateur de charge sur l'un des appareils durant la période du 4 mai 2020 au 12 mai 2020 (temps de commande et disponibilités de la personne ayant les compétences pour travailler sur l'instrument au sein du SAM-ULiège). La charge des instruments est cependant beaucoup plus contraignante puisque pour envisager de débiter la journée avec des instruments complètement chargés, il faut que ceux-ci soient branchés 14 heures !

Les données sont enregistrées sur la carte SD sous forme d'un fichier « .TXT » dont le nom prend la forme « yymmdd » avec y = year, m = month, d = day. Les variables mesurées à chaque temps t sont reprises en 8 colonnes :

- Date en format dd/mm/yyyy HH:MM:SS ;
- Concentration des PM_{2,5} mesurée par le capteur 1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ;
- Concentration des PM_{2,5} mesurée par le capteur 2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ;
- Concentration des PM_{2,5} mesurée par le capteur 3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ;
- Température ($^{\circ}\text{C}$) ;
- Humidité relative (%) ;
- Pression (hPa) ;
- Battery (%).

Les concentrations sont indiquées sans décimales.

VI.1.2. Capteurs Honeywell HPM115S0

L'Annexe 1 provient du constructeur et contient toute l'information intéressante pour comprendre le fonctionnement des capteurs Honeywell HPM115S0. Il sera donc indiqué dans ce point uniquement les grandes lignes pour expliquer les caractéristiques et le fonctionnement de ces capteurs au sens large.

Les capteurs Honeywell HPM 115S0 sont des capteurs low-cost reposant sur le principe de diffraction optique (Figure 21) comme explicité dans la partie III.8.6. Un flux d'air chargé de particules est aspiré à l'intérieur du capteur. Ce flux d'air est entraîné dans le capteur par un ventilateur. Durant son parcours à l'intérieur du capteur, le flux d'air chargé de particules passe à travers un faisceau laser dirigé vers un piège de lumière. Celui-ci voit son intensité modifiée par le passage de particules et une photodiode est intégrée au parcours afin d'enregistrer cette information via un convertisseur photoélectrique. L'information est convertie en signal électrique qui permet de connaître la concentration en particules de type PM_{2,5} en µg/m³ mesuré par le dispositif.

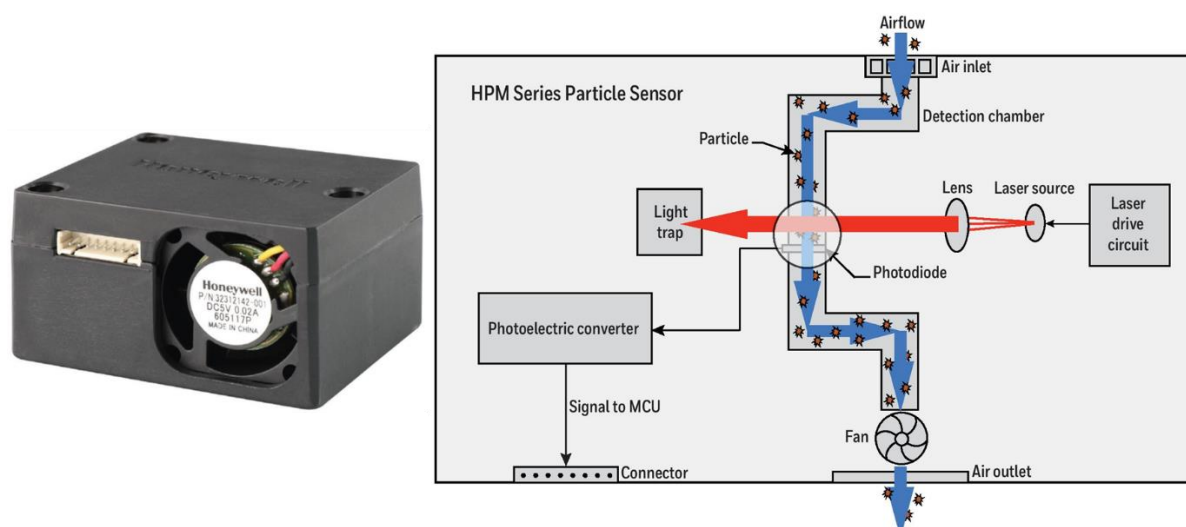


Figure 21 - Aspect extérieur des capteurs (gauche) et principe de fonctionnement du capteur (droite).
Source : Annexe 1

| Caractéristiques | Paramètres |
|---|---|
| Principe de fonctionnement | diffusion laser |
| Particules détectées | PM _{2,5} (éventuellement les PM ₁₀ estimés) |
| Données produites | PM _{2,5} en µg/m ³ |
| Concentrations permises | de 0 à 1000 µg/m ³ |
| Incertitude déclarée (à 25°C ± 5°C) : 0 à 100 µg/m ³ 100 à 1000 µg/m ³ | ± 15µg/m ³ ± 15 % |
| Temps de réponse | 6 secondes |
| Température : de fonctionnement de stockage | -10°C à 50°C -30°C à 65°C |
| Humidité relative admise (stockage et fonctionnement) | de 0% à 95% sans condensation |

Tableau 6 - Principales caractéristiques des capteurs Honeywell.
Source : Simon, 2019

L'Annexe 3 reprend un mail procurant une série d'informations de la part du constructeur des micro-capteurs. Ceux-ci sont calibrés par le constructeur sur base de fumée de cigarettes. Les appareils peuvent mesurer des particules dont la taille est comprise entre 0,3 et 5 µm. Ils sont capables d'indiquer une concentration en PM₁₀ moyennant le paramétrage à l'aide d'un algorithme (il s'agira d'office d'une valeur calculée puisque les capteurs ne parviennent pas à réaliser la mesure de particules dont le diamètre est supérieur à 5 µm).

VI.1.3. Station météo

La mesure de polluants atmosphériques s'accompagne généralement d'un suivi des conditions météorologiques propres au site d'étude. Dans le cadre de cette campagne, il n'existe pas de station météo publique propre à Arlon comme ça a été expliqué auparavant au *Point V.2*. Il aurait donc fallu regrouper l'information de diverses sources ou utiliser un site tel que Meteoblue qui fonctionne sur base de modèles historiques pour réaliser ces prévisions. Le problème est que Meteoblue ne permet pas un accès permanent aux données et que pour obtenir celles-ci pour une longue période dans le passé, il est nécessaire de passer par la version premium proposée pour une localisation.

Au vu de ces différentes contraintes, il a été envisagé de travailler avec une station météo privée liée à l'Université de Liège, Département Sciences et Gestion de l'Environnement, campus d'Arlon. Cette station, bien que présente physiquement, n'était plus suivie et les données n'étaient plus enregistrées par l'équipe de chercheurs en charge de celle-ci. Après quelques mails, la station a été réactivée et l'enregistrement des données a pu recommencer. Les fichiers obtenus à l'aide de la station sont des fichiers .csv où chaque ligne correspond à une donnée horaire et les colonnes correspondantes sont :

- Date et heure ;
- Baromètre [pouces de mercure] ;
- Température [°C] ;
- Température maximale [°C] ;
- Température minimale [°C] ;
- Humidité [%] ;
- Point de rosée [°C] ;
- Wet Bulb [°C] ;
- Vitesse du vent [m/s] ;
- Direction du vent ;
- Parcours du vent [m] ;
- Vitesse du vent maximale [m/s] ;
- Direction du vent le plus puissant ;
- Refroidissement éolien [°C] ;
- Indice de chaleur [°C] ;
- Indice température humidité vent ensoleillement [°C] (2 colonnes différentes sans distinction) ;
- Pluie [pouces] ;
- Taux de pluie [pouces/heure] ;
- Rayonnement solaire [W/m²] ;
- Energie solaire [Langley] ;
- Rayonnement solaire maximal [W/m²] ;
- « TE » [pouces] ;
- Degrés-jours de chauffage ;
- Degrés-jours de climatisation.

Malgré la multitude de colonnes et d'informations enregistrées, les données météorologiques de cette station ne seront pas utilisables. En effet, comme mentionné, la station a été relancée après une période d'absence de suivi. Lors de questionnements sur la méthode de mesure (est-ce qu'il s'agit de mesures instantanées ou de mesures moyennées ? Quelle timezone est appliquée aux mesures ? Existe-t-il des documents donnant des indications sur les appareils utilisés et les mesures effectuées accompagnant la station ?), aucune réponse n'a pu être obtenue en raison des circonstances particulières de cette année et de la sortie de l'état de « dormance » de la station.

Les données sont malgré tout collectées et il est probablement possible d'obtenir réponses aux différentes interrogations dans un contexte différent que celui de la pandémie facilitant la discussion et l'interaction sur site. Il est donc intéressant de creuser de ce côté-là par la suite si une personne reprend le sujet et souhaite réaliser un lien avec les conditions météorologiques dans l'optique d'expliquer certains résultats.

VI.1.4. Capteurs de référence ULiège

Dans l'optique de la campagne de mesure réalisée pour ce travail, il a été envisagé d'ajouter un capteur de référence de PMs qui aurait été placé sur le campus de l'Université de Liège, Département Sciences et Gestion de l'Environnement du campus d'Arlon. La situation de celui-ci correspondait à un espace vert autour duquel le trafic n'est pas en contact direct. Il aurait servi de référence en tant que mesure de concentrations PM_{2,5} en fond urbain sans interaction avec le trafic routier par rapport aux mesures réalisées à l'aide des instruments avec les 3 capteurs PMs du SAM-ULiège.

Cependant, avec les conditions particulières de cette période de mesure, il n'a pas été possible d'installer ce capteur de référence. Les mesures utilisées comme référence pour comparaison proviendront donc de la station rurale d'Habay dont le code d'identification sur le site d'IRCELINE est « 43N132 » et dont la gestion est assurée par l'ISSeP. L'instrument de mesure pour la station concernée est le GRIMM EDM 180 qui a été explicité dans la *Partie III.8.2*.

L'ensemble des données historiques pour cette station proviennent du site https://www.irceline.be/fr/qualite-de-lair/mesures/monitoring-stations/carte-interactif?set_language=fr et de l'outil « Carte interactive » qui y est proposé. La station d'Habay a été sélectionnée, puis le polluant (PM_{2,5}) et ensuite les dates d'intérêt correspondant à la période de mesure à l'aide des instruments du SAM-ULiège (de mars à fin juin).

VI.1.5. Compteurs Radar ISSeP

Ce travail devait normalement s'articuler autour d'un précédent travail qui visait à mettre en évidence l'impact du trafic scolaire sur les concentrations en PM_{2,5} autour des entrées de l'INDA. Le travail dont il était question : « Simon, F. (2019). *Les particules PM_{2,5}: Influence du trafic de dépose scolaire sur la qualité de l'air d'une école Modélisation ENVI-MET et mesures à l'aide de capteurs "low cost."* Université de Liège, Arlon. ».

Cependant, au vu du contexte de pandémie de coronavirus qui a touché l'année 2020, le travail a été réorienté dans une optique d'étude du trafic et de l'évolution de celui-ci en fonction des décisions prises par les autorités gouvernementales dans le cadre de la gestion de cette pandémie.

Pour obtenir des données sur le trafic, une demande a été effectuée auprès de l'ISSeP pour l'installation de compteurs de trafic routier de type TMS-SA. Il est important de noter à ce stade qu'en plus d'avoir accepté un prêt des radars durant une longue période (du 24 mars au 14 juillet avec parfois quelques jours d'interruption en fonction de l'autonomie des compteurs radar), l'ISSeP a assuré l'ensemble de la logistique de ces compteurs radar. Grâce à leur collaboration, il a été possible de relever des données trafic uniques à Arlon durant la pandémie et la gestion de celles-ci par les autorités gouvernementales.

Il existe des données liées au trafic routier pour l'année 2019 qui s'étalent du 16 avril au 03 mai 2019 (Simon, 2019). Celles-ci seront utilisées à titre de comparaison par rapport aux données de l'année 2020.

Les radars TMS-SA reposent sur le principe de l'effet Doppler et comptent les véhicules soit sur une voie unidirectionnelle, soit sur 2 voies en sens opposé en fonction de l'installation réalisée. Le comptage est réalisé à l'aide du moteur intégré à l'antenne interne. Le radar s'accompagne d'un logiciel permettant d'extraire les données et de réaliser des statistiques sur base de celles-ci (MAGSYS, 2020). Le compteur radar permet de compter les véhicules, mais aussi de mesurer la vitesse de ceux-ci ainsi que la longueur des véhicules, ce qui permet la distinction entre les véhicules de type lourd (bus, camion, etc) et les véhicules légers (Icoms Detection S.A., 2020; MAGSYS, 2020).

Il n'a pas été possible de placer tous les compteurs radar exactement aux mêmes endroits que pour l'année 2019. En effet, un chantier a lieu à l'emplacement de 2019 pour la rue Joseph Netzer, ce qui a contraint le positionnement à un autre endroit. Les radars ne peuvent pas être placés n'importe où ! Ils doivent être installés en hauteur pour ne pas être influencés par les passants, mais aussi pour les protéger de personnes malintentionnées. Pour que les radars soient fonctionnels, il est nécessaire de leur indiquer quelques informations :

- La hauteur à laquelle ils sont placés ;
- Si la voie est uni ou bidirectionnelle ;
- La distance poteau-axe rue.

Les données nécessaires pour leur mise en marche sont reprises dans le *Tableau 7*.

| RADAR | Lieu | Hauteur | Distance Poteau-Axe rue | Direction |
|---------|---------------------|---------|-------------------------|-----------------|
| 19B0050 | Avenue Victor Tesch | 2.3 m | 4.3 m | Bidirectionnel |
| 19B0052 | Rue du Casino | 2.3 m | 5.2 m | Unidirectionnel |
| 19B0053 | Rue Joseph Netzer | 2.8 m | 3,4 m | Unidirectionnel |

*Tableau 7 - Informations relatives au placement des compteurs de véhicule type TMS-SA.
Source : Echanges de mails avec Monsieur Nicolas Fernémont (ISSeP)*

La *Figure 22* reprend la position des radars pour l'année 2020 (étoiles), l'emplacement des instruments (ronds roses) ainsi que la position du radar pour la rue Joseph Netzer lors de l'année 2019 (Google Maps).



Figure 22 - Carte de localisation des instruments du SAM-ULiège et des compteurs radars TMS-SA

La *Figure 23* reprend des photographies de la position de ceux-ci dans la rue correspondante pour l'année 2020.

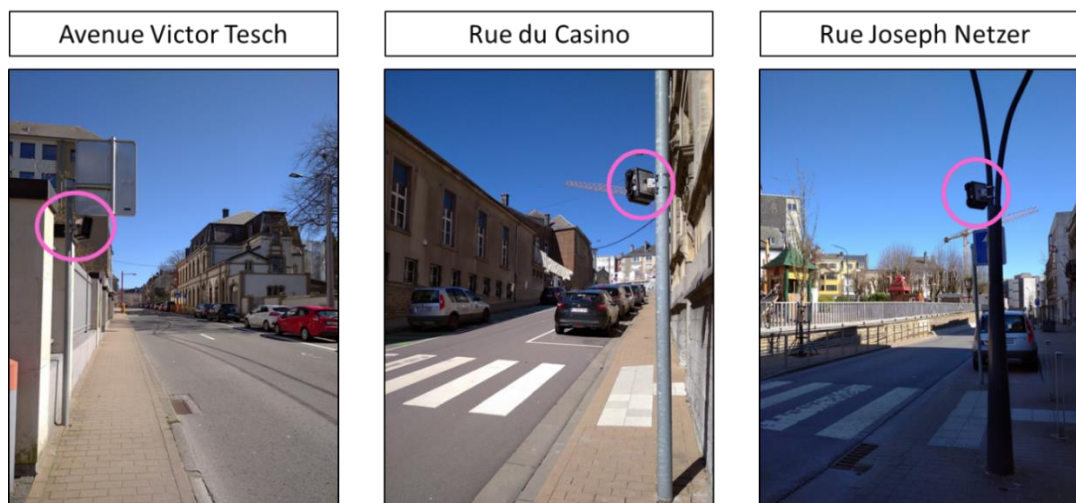


Figure 23 - Photographies du positionnement des compteurs radar TMS-SA

A l'aide de ce type de compteurs radar et du logiciel qui lui est associé, des tableaux aux différentes extensions sont obtenus. Pour l'année 2020, les données évoluent par minute, par contre, pour l'année 2019, ce sont des données horaires qui ont été demandées à l'ISSeP. Les colonnes constituant les tableaux sont les suivantes :

- N° période ;
- Date ;
- Heure ;
- Vitesse moyenne ;
- Catégorie 1 (véhicules légers) ;
- Catégorie 2 (véhicules lourds) ;
- Total.

VI.1.6. RStudio

Le logiciel RStudio a été utilisé tout au long de ce travail pour le traitement des données récoltées lors de la campagne de mesure.

Une série de codes réalisés dans le logiciel Rstudio accompagne le dossier de travail. Rstudio est un environnement de développement gratuit, libre et multiplateforme pour R qui est un langage de programmation (Wikipédia, 2020f). Le logiciel est disponible par téléchargement via le lien <https://rstudio.com/>.

VI.2. Méthodes

VI.2.1. Positionnement des capteurs

Comme déjà expliqué plusieurs fois au cours de ce travail, le sujet a dû être modifié en raison de la pandémie de coronavirus qui a eu lieu durant cette année 2020. Pour rappel, le sujet initial visait à étudier la concentration en $PM_{2,5}$ autour d'un établissement scolaire présentant plusieurs entrées. L'objectif poursuivi dans ce sujet était d'étudier l'exposition des écoliers aux $PM_{2,5}$. Avec la réorientation du sujet, il aurait pu être intéressant d'élargir le site d'étude, cependant celui-ci présentait une série de particularités le rendant particulièrement intéressant :

- L'INDA est proche du centre urbain de la ville ;
- Les rues bordant l'établissement scolaire présentent une série de particularités ;
- Malgré la suspension de cours, il est possible de réaliser un lien avec l'exposition des individus, du moins dans les conditions des mesures effectuées ;
- Les autorisations de mesures avaient déjà été obtenues ;
- Etc

Dans le positionnement des capteurs au niveau des 3 entrées, une grande attention a été portée aux cendriers situés aux alentours de l'entrée. En effet, le tabagisme se réalise par combustion de tabac qui génère des particules fines pouvant interférer dans la mesure avec les capteurs low-cost. Sur la *Figure 24*, les 3 entrées de l'établissement scolaire sont photographiées et les instruments sont entourés d'un cercle rose.

La *Figure 22* vue précédemment indique le positionnement des instruments par des ronds roses.



Figure 24 - Photographie de la position des capteurs dans les 3 autour de l'INDA

Il est important de noter qu'il aurait été intéressant de placer les capteurs à « hauteur d'homme » afin de pouvoir relier les concentrations mesurées aux concentrations inhalées par les individus aux entrées de l'école. Cependant, puisque les instruments sont placés en début de journée et repris en fin de journée et qu'il n'y a pas de surveillance, il est indispensable de les placer de manière à ce que les personnes n'aient pas facilement accès à ceux-ci. De cette manière, les personnes malintentionnées peuvent être découragées.

Les instruments ont été respectivement placés aux hauteurs suivantes (la mesure a été effectuée le 09 juin 2020 et le mètre part du sol jusqu'à « l'ouïe d'aspiration » de l'instrument) :

- Rue Joseph Netzer : 2.80m ;
- Rue du Casino : 2.50m ;
- Avenue Victor Tesch : 2.95m.

Lors du placement et de l'enlèvement des instruments, des prises de notes ont été réalisées conduisant au dressage d'un tableau de bord repris en *Annexe 7*. Parmi les notes prises, il y avait notamment les heures d'intérêt (présence sur site, placement ou enlèvement des instruments), certaines informations

concernant la nébulosité, toute particularité que ça soit humaine ou météorologique (présence de vents inhabituels, débuts de chantiers ou d'activités produisant de la poussière) etc.

Il est important de noter que les instruments sont placés aléatoirement dans les rues. L'instrument 1 ne mesure pas en permanence une rue en particulier, idem pour l'instrument 2 et l'instrument 3. De cette manière, si un instrument dysfonctionne complètement, ce dysfonctionnement n'impactera pas les données pour la même rue durant toute la période d'étude.

VI.2.2. Période de mesures

Les périodes de mesure sont limitées par l'autonomie des instruments comme il a été mentionné auparavant. Il n'est donc pas possible d'avoir des mesures en continu sur plus de 9-10 heures.

Les capteurs HPMA115S0 présentent une limite d'utilisation à une humidité relative maximale de 95%. Il est donc nécessaire d'éviter les journées pluvieuses malgré l'étanchéité des instruments du SAM-ULiège pour le bon fonctionnement des capteurs mais aussi parce que les précipitations interfèrent avec les mesures de particules fines en suspension. La période d'échantillonnage dépend donc du nombre de journées pluvieuses empêchant le placement des capteurs. Afin d'obtenir un jeu de données le plus large possible, dès qu'une journée le permettait (conditions météorologiques favorables et disponibilités personnelles), les instruments étaient placés. Cependant, au cours des mesures, certains instruments ont présenté des problèmes liés à la charge (notamment à cause du régulateur de charge). Il est donc possible d'avoir uniquement 2 instruments placés pendant que le 3^{ème} était en réparation. Avec ces conditions, la durée d'échantillonnage est respectivement de 48 journées d'une durée de 8-10h pour l'Avenue Victor Tesch et la rue du Casino et 49 journées d'une durée similaire pour la rue Joseph Netzer.

Par souci organisationnel, les instruments étaient généralement placés avant 7h30 et repris après 16h30. De cette façon, malgré la suspension des cours par les autorités gouvernementales, le placement et la reprise des instruments étaient coordonnés avec les horaires de l'établissement scolaire. Les horaires auraient pu être différents puisque le sujet a été revu en raison de la pandémie de coronavirus mais par facilité, le planning a été conservé malgré cette réorientation du sujet.

Pour information, l'établissement scolaire dispense des cours pour les secondaires de 8h00 à 15h55 sauf le mercredi où ceux-ci terminent à 12h25. La partie fondamentale et maternelle dispense des cours de 8h15 à 15h15. Il existe un service de garderie qui ouvre à 7h30 et qui ferme à 18h00. Ce service de garderie est resté actif durant la période de pandémie puisqu'il était nécessaire de faire garder les enfants du personnel soignant ne pouvant plus être gardés par les grands parents qui constituaient une population à risque pour la maladie covid-19.

VI.2.3. Correction des heures et application d'une même timezone

Les données utilisées sont essentiellement des données temporelles. Dès qu'il s'agit de mesures temporelles, il faut se référer à la timezone dans laquelle les heures sont exprimées. Une correction sera appliquée pour chaque jeu de données afin que celui-ci soit exprimé en UTC 0.

En comparaison pour la Belgique, l'heure est généralement exprimée en UTC +2 lors de l'heure d'été et en UTC +1 lors de l'heure d'hiver (timeanddate.com, 2020).

Dans le cadre des mesures avec les instruments contenant les 3 capteurs PMs, il a fallu réaliser des corrections supplémentaires. En effet, l'heure indiquée par les instruments était complètement décalée de l'heure réelle à laquelle l'instrument était placé. La correction a pu être effectuée grâce à la prise de notes dans le tableau de bord mentionné au point VI.2.1.

Pour réaliser cette correction, il a été relevé l'heure à laquelle l'instrument est placé et l'heure indiquée sur la carte SD pour chaque journée. Une différence moyenne a été réalisée puis la correction a été appliquée comme représenté en *Annexe 6*. Le passage en timezone UTC 0 n'est pas représenté sur l'annexe.

VI.2.4. Inter-comparaison

Dans le cadre de ce travail, il n'a pas été possible de réaliser des mesures en parallèle d'un instrument plus précis du type GRIMM EDM 180 utilisé notamment dans les réseaux de mesure de l'ISSeP. Ce type de mesure aurait permis d'avoir une valeur de référence et de voir à quel point les capteurs low-cost s'éloignent ou se rapprochent de cette valeur de référence.

A défaut de cette possibilité, c'est une inter-comparaison entre les capteurs qui a été effectuée. Pour la réalisation de celle-ci, il a fallu placer les capteurs au même endroit, au même moment, dans les mêmes conditions.

Cette inter-comparaison permet de calculer l'incertitude entre les capteurs de même type, celle-ci est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$u(bs, s) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,1} - y_{i,2})^2}{2n} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$u(bs, s) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (y_{i,j} - y_m)^2}{n(p-1)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Avec :

- $y_{i,1}$, $y_{i,2}$ et $y_{i,j}$ sont les mesures des capteurs pour la période i ;
- y_m est la moyenne pour la période i ;
- n est le nombre de mesures au cours du temps ;
- p est le nombre de réplicats pour la période i .

Cette formule provient du « Draft du CEN/TG 264 d'août 2019 : Air Quality Performance Evaluation of Air Quality Sensors part 1 – Gaseous pollutants in ambient air ».

VI.2.5. Sélection des données des capteurs au sein d'un même instrument

Il a parfois été observé lors de la visualisation des données qu'un capteur au sein d'un même instrument ne réponde pas de la même manière que les deux autres. Cet effet est marqué à la fois lorsque le capteur en question perçoit une augmentation de la concentration des particules fines, ce qui se matérialise sous la forme d'un pic, mais aussi lorsque le capteur ne perçoit aucune information alors que les 2 autres capteurs ont observé un événement sous forme de pics.

En effet, dans l'objectif de comparer les profils des concentrations en $PM_{2,5}$ entre les 3 rues, une concentration moyenne pour chaque instrument est calculée sur base des concentrations mesurées par les 3 capteurs Honeywell HPM115S0. Cependant, une concentration moyenne calculée sur base de 3 autres concentrations peut être grandement influencée si l'une des 3 concentrations, supposée similaire aux autres, prend des valeurs complètement différentes. Il est donc nécessaire de réaliser une sélection adéquate des valeurs conservées pour le calcul de concentration.

Il est facilement admis les hypothèses suivantes :

- Si un capteur observe une concentration en $PM_{2,5}$ importante alors que les autres n'en ont pas mesuré, il est probable que le capteur en question s'est encrassé ou qu'il a eu une erreur lors de la mesure ;
- Il est plus envisageable l'option ci-dessus plutôt que celle de dire que les 2 autres capteurs n'ont pas réagi suite à une erreur de fonctionnement au même moment ;
- Il en est de même si la situation s'inverse et que le capteur n'observe pas de concentration en $PM_{2,5}$ importante alors que les 2 autres capteurs en observent une.

Sur ces bases, il faut être en mesure d'automatiser la sélection des concentrations dont on tient compte pour le calcul de la concentration moyenne par instrument correspondant à une rue en particulier. Pour ce faire, on sélectionne la médiane des 3 capteurs. Celle-ci correspond automatiquement à la concentration intermédiaire mesurée par l'un des 3 capteurs constituant l'instrument. Cette médiane va permettre de déterminer la borne supérieure et la borne inférieure de l'intervalle dans lequel les concentrations mesurées sont acceptées. En effet, le constructeur déclare une incertitude de $(\pm) 15$

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ si la concentration mesurée est inférieure à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une incertitude de $(\pm) 15\%$ lorsque la concentration mesurée est supérieure à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De cette manière, les concentrations ne correspondant pas à l'intervalle défini par l'incertitude annoncée par le constructeur sont enlevées du calcul de la concentration moyenne correspondante à la concentration de l'instrument. Ainsi, on retire les situations où un capteur réagit de manière différente des 2 autres capteurs.

Afin d'illustrer le principe de sélection des mesures, quelques graphiques sont présentées sur la Figure 25.

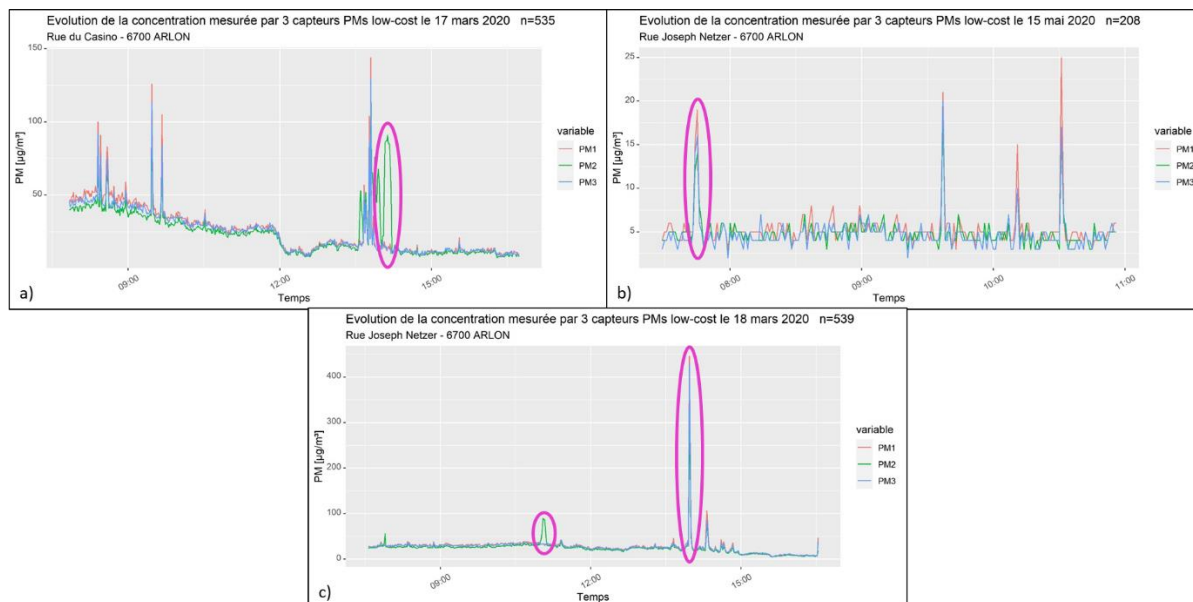


Figure 25 - Exemples de pics enlevés par le processus de sélection des pics

La Figure 25 est scindée en 3 graphiques :

- Un pic vert est mis en évidence. Celui-ci représente une situation lors de laquelle un seul capteur mesure une concentration en $\text{PM}_{2,5}$ élevée. La médiane dans ce cas, calculée sur base des 3 valeurs obtenues par les 3 capteurs, est représentée soit par la courbe bleue ou rouge. A l'aide des informations du fabricant, une gamme d'acceptation autour de la courbe rouge et bleue s'étend à $+15$ et $-15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ permettant d'exclure le pic vert et de calculer la moyenne sur les valeurs mesurées par le capteur bleu et le capteur rouge ;
- Le pic mis en évidence est caractérisé par une mesure d'un événement par les 3 capteurs mais dans des gammes différentes. La médiane ici correspond à la courbe rouge à l'instant du pic. Avec les informations du constructeur, la gamme d'acceptation s'étend de manière à tenir compte du capteur bleu et du capteur vert pour le calcul de la moyenne ;
- Le premier pic vert mis en évidence n'est pas pris en compte au même titre que le pic représenté en « a) ». Cependant pour le second pic mis en évidence, un événement s'accompagnant d'une concentration élevée en $\text{PM}_{2,5}$ est observé. Dans cette situation, les capteurs ont tous observé l'événement et ont réagi dans des gammes différentes. La gamme d'acceptation définie par les informations provenant du constructeur permet de sélectionner les concentrations mesurées par les 3 capteurs et de réaliser la moyenne sur cette base de 3.

Cette sélection est réalisée à l'aide des informations fournies par le constructeur et sur base de la médiane qui correspond obligatoirement à la concentration mesurée par le capteur « intermédiaire » de l'instrument. Cette méthode permet d'exclure les valeurs extrêmes dans le calcul de la moyenne.

VI.2.6. Test de normalité

Il est souvent intéressant de vérifier le type de distributions que prend les données, notamment pour identifier si, pour comparer plusieurs séries de mesures correspondant à plusieurs échantillons, il est préférable d'utiliser des tests paramétriques ou des tests non paramétriques. Les tests paramétriques sont considérés plus puissants que leurs équivalents non-paramétriques tandis que les tests non-paramétriques peuvent s'appliquer plus largement dans davantage de situations. Cette puissance se caractérise par le fait qu'ils conduisent plus facilement au rejet de l'hypothèse nulle (H_0) si ce rejet est justifié. Ceci se traduit mathématiquement par une p-value qui sera inférieure dans le cadre de tests paramétriques plutôt que non-paramétriques. L'application d'un test paramétrique permet donc d'arriver plus facilement au rejet de l'hypothèse nulle quand le rejet est justifié. Il est donc préférable d'utiliser ce type de tests mais ceux-ci reposent sur le principe de distributions statistiques particulières dans les données et il est donc nécessaire de vérifier les conditions d'application des tests. Ces conditions dépendent du test en question mais généralement, il est nécessaire de vérifier la normalité de la distribution des données (XLStat, 2020).

Pour vérifier la normalité, il est habituellement préféré le test de Shapiro-Wilk parmi une série d'autres tests (test de Kolmogorov Smirnov, test d'Anderson-Darling, test de D'Agostino, etc) qui s'appliquent plus ou moins bien en fonction des conditions caractérisant les échantillons.

Cependant, ce test de Shapiro n'a pas permis de réaliser des tests de normalité sur les échantillons résultant des campagnes de mesure car il n'accepte qu'une population maximum de 5000 individus (Srinivasan, 2013).

Les tests de normalité disponibles avec R sont des tests statistiques dont les hypothèses sont les suivantes :

- H_0 : L'échantillon provient d'une distribution normale (Srinivasan, 2013) ;
- H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une distribution normale (Srinivasan, 2013).

Lorsque le test est encodé sur l'échantillon, il indique la valeur de la p-value correspondante. Si cette p-value prend une valeur inférieure à 0,05, on rejette l'hypothèse nulle à savoir que l'échantillon provient d'une distribution normale et inversement si la p-value prend une valeur supérieure à 0.05, l'hypothèse nulle n'est pas rejetée et donc il est assumé que l'échantillon présente une distribution normale (Fellows, 2011).

Généralement, pour des échantillons de petite taille, le test de la normalité conduira à accepter l'hypothèse nulle alors que lorsqu'un échantillon présente une taille importante, même s'il provient d'une distribution normale, le test de la normalité conclura que l'échantillon ne suit pas une distribution normale (Fellows, 2011).

Pour corroborer ces observations liées à la taille d'un échantillon, un test d'Anderson-Darling a été réalisé sur base d'un échantillon fictif créé depuis une population normale théorique et pour une taille importante (dans l'exemple il s'agit de 500 000 individus) et le test de normalité donne comme résultat une p-value très proche de 0 et donc un rejet de l'hypothèse nulle.

L'échantillon ne suit donc pas une distribution normale au sens strict du résultat formulé par le test. Pourtant, la distribution en histogramme et le diagramme quantile-quantile montrent que l'échantillon présente effectivement une distribution normale remettant en question le résultat du test (Figure 26).

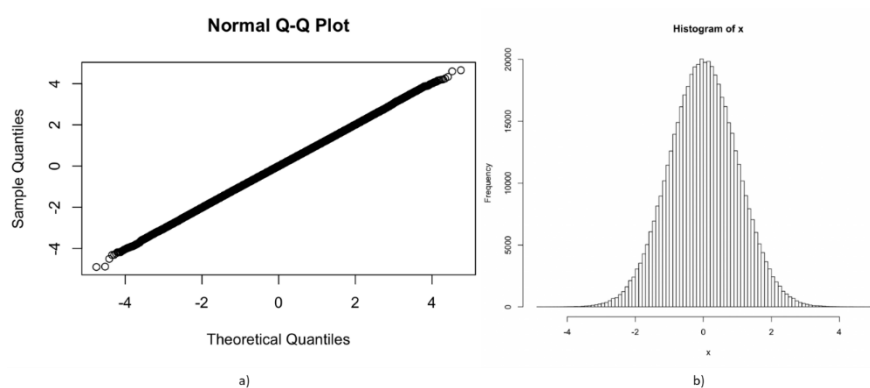


Figure 26 – Echantillon fictif créé à partir d'une loi normale

a) Diagramme quantile-quantile de l'échantillon

b) Histogramme de distribution de l'échantillon

Source : Fellows, 2011

Dans la suite de ce travail, si la normalité se doit d'être testée, elle sera plutôt testée en réalisant des graphiques de type diagramme quantile-quantile ou graphique de densité ou histogramme de distribution pour jauger la normalité ou non de l'échantillon. En effet, puisque les échantillons utilisés dans le cadre de ce travail proviennent d'une campagne de mesure, il s'agit d'échantillons d'une certaine taille et les tests sur des échantillons de grande taille conduisent souvent au rejet de l'hypothèse nulle et donc de la provenance d'une loi normale de l'échantillon. Les diagrammes quantile-quantile seront donc privilégiés dans le cadre de ce travail car ils laissent moins de possibilités d'interprétation de la part de l'opérateur et que ces fonctions dans le logiciel R sont particulièrement bien réalisées (De Vries & Meys, 2020).

Il faut noter que lorsqu'il est difficile de respecter les conditions d'application d'un test statistique, il existe généralement un test plus robuste pouvant être appliqué dans davantage de situations. L'utilisation d'un test statistique moins contraignant permet malgré tout de tirer des conclusions et il est donc parfois préférable de s'orienter vers des tests qui s'appliquent plus largement (Millot, 2018).

VI.2.7. Test statistique utilisé

Toute l'information contenue dans cette partie du rapport provient de : « Millot, G. (2018). *Comprendre et réaliser les tests statistiques à l'aide de R* (4th ed.). Louvain-la-Neuve: DeBoeck Supérieur. »

Dans le cadre de ce travail, c'est toujours le même test statistique non-paramétrique qui sera appliqué. Il s'agit du test de Kruskal-Wallis. Ce test poursuit l'objectif de comparer des médianes observées dans un contexte où les variables mesurées et donc testées correspondent à une variable quantitative et une variable qualitative à plusieurs classes.

Il existe une série de conditions d'application dans le cadre de l'utilisation de ce test statistique :

- 1) Les individus formant l'échantillon doivent être choisis un par un et aléatoirement dans l'ensemble de la population visée ;
- 2) Les classes de la variable qualitative doivent être exclusives ;
- 3) Dans la population visée, les distributions de la variable quantitative dans les classes de la variable qualitative doivent avoir la même forme, peu importe celle-ci ;
- 4) La variable quantitative peut être continue ou discrète. Une variable semi-qualitative ou qualitative ordinale convient également ;
- 5) La variable qualitative est nominale ;
- 6) La variable qualitative peut être fixée.

Dans le cadre des échantillons sur lesquels les tests sont effectués, seule la condition 3 nécessite une vérification. Si les distributions sont identiques, les conclusions du test peuvent porter sur les médianes. Cependant, si les distributions sont différentes, il faut faire preuve de prudence et plutôt orienter les conclusions du test sur les tendances plutôt que les médianes.

Les hypothèses du test sont les suivantes (celles-ci sont présentées selon la condition où les distributions sont identiques) :

- H_0 : Les k médianes sont identiques dans la population visée ;
- $H_{1,bilat}$: Au moins une des médianes diffère d'au moins une autre des médianes dans la population visée.

Lorsque la formule associée au test est indiquée dans le logiciel RStudio (« `kruskal.test()` »), il présente le résultat sous forme notamment de p-value. Celle-ci peut prendre une valeur supérieure ou inférieure au seuil α défini. Celui-ci est défini par défaut à 5% et il faut donc se référer à la valeur 0.05.

Les conclusions du test sont donc les suivantes :

- Si $p\text{-value} < 0.05$: Rejet de H_0 . Ce résultat signifie dans le cas d'un test bilatéral (ce qui est le cas par défaut) que les fluctuations d'échantillonnage ne suffisent pas pour expliquer la différence entre les médianes observées. Il en résulte donc qu'au moins une des médianes diffère d'au moins une autre des médianes dans la population visée.
- Si $p\text{-value} > 0.05$: Non-rejet de H_0 . Ce résultat traduit que les différences entre les médianes observées ne sont pas significatives. Elles ne semblent dues qu'à la fluctuation d'échantillonnage et donc rien ne permet de réfuter, pour l'instant, que les médianes sont identiques dans la population visée.

Ce test peut être poussé plus loin en effectuant la comparaison des médianes (ou tendances si les distributions ne sont pas identiques) observées 2 à 2. Par cette méthode, il est possible d'identifier les couples qui diffèrent significativement parmi l'ensemble des médianes testées auparavant. Pour ce faire, il faut indiquer au logiciel RStudio une nouvelle fonction qui est « `pairwise.wilcox.test()` ». L'une des particularités ici est qu'il est nécessaire de réaliser une correction de Holm indispensable lorsque des tests statistiques sont effectués 2 à 2. Ce test sera appliqué plutôt que celui de Kruskal-Wallis.

VII. Résultats et analyses

VII.1. Introduction

L'ensemble des résultats présentés dans ce point proviennent d'un traitement de données effectué avec RStudio. Le traitement se présente sous la forme de codes qui ont été regroupés dans un dossier et remis en même temps que ce travail.

VII.2. Inter-comparaison

Comme mentionné au point VI.2.4., une étude d'inter-comparaison a été réalisée avec les capteurs low-cost constituant les différents instruments du SAM-ULiège.

L'objectif recherché est de calculer l'incertitude entre ces capteurs. Pour ce faire, une campagne de mesures a été réalisée en plaçant les instruments au même endroit en même temps. Chaque instrument présente une batterie indépendante des autres instruments, ce qui a conduit, au cours de cette campagne de mesures de 6 jours, à ce que certains des instruments soient hors tension. Avant d'effectuer le calcul d'incertitude, seules les périodes communes pour lesquelles les 2 instruments ont fonctionné simultanément, sont conservées. Une fois ce tri réalisé, le jeu de données affiche 2108 lignes correspondant à 2108 minutes de mesure de concentration en $PM_{2.5}$ au cours de ces 6 journées.

Le calcul d'incertitude prend différentes valeurs en fonction du nombre de capteurs pris en considération dans le calcul. L'incertitude de l'instrument numéro 1 (3 capteurs) vaut $0.92 \mu g/m^3$. L'incertitude de l'instrument numéro 2 (3 capteurs) vaut $0.81 \mu g/m^3$. L'incertitude de l'instrument numéro 3 (3 capteurs) vaut $0.78 \mu g/m^3$. Enfin, si le calcul est effectué sur base des 9 capteurs en tenant compte des 3 instruments, l'incertitude vaut $0.72 \mu g/m^3$.

Il faut néanmoins préciser que les concentrations en $PM_{2.5}$ mesurées par les capteurs des instruments du SAM-ULiège sont des valeurs à l'unité. Les incertitudes présentées ci-dessous doivent donc être arrondies à l'unité et prennent la valeur d'1 $\mu g/m^3$.

Pour accompagner ces résultats, le *Tableau 8* donne les différents quantiles propres aux jeux de données de chaque capteur ainsi que les valeurs minimales, maximales et moyennes.

| | Instrument 1 | | | Instrument 2 | | | Instrument 3 | | |
|---------|--------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| | Capteur 1 | Capteur 2 | Capteur 3 | Capteur 1 | Capteur 2 | Capteur 3 | Capteur 1 | Capteur 2 | Capteur 3 |
| Min. | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1st Qu. | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Median | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| Mean | 3.9 | 3.9 | 3.4 | 3.8 | 3.5 | 3.8 | 3.4 | 3.5 | 3.5 |
| 3rd Qu. | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| Max. | 57 | 57 | 51 | 60 | 59 | 59 | 67 | 70 | 65 |

Tableau 8 - Statistiques descriptives de chaque capteur (Concentrations en $\mu g/m^3$)

Ce tableau de statistiques descriptives permet de tirer certaines conclusions ou du moins certaines informations.

Les résultats ont été obtenus sur base d'un jeu de données dont 75% des concentrations mesurées sont comprises entre 1 et 5 $\mu g/m^3$. Le maximum observable, pour chaque capteur, est compris entre 51 et 70 $\mu g/m^3$ (ce maximum correspond à un point unique dans le jeu de données).

Enfin, un graphique de corrélation de Spearman (*Figure 27*), aussi appelé matrice de corrélation, a été réalisé entre les différents capteurs (variables testées) afin de mettre en évidence une série d'éléments tels que :

- La diagonale représente la distribution de chaque variable (STHDA, 2020a);
- La partie au-dessus de la diagonale représente les coefficients de corrélation entre les variables testées. Le nombre d'étoiles représente la significativité (STHDA, 2020a);
- La partie en-dessous de la diagonale représente des nuages de points accompagnés d'une courbe de tendance (STHDA, 2020a).

Il faut préciser qu'il existe plusieurs coefficients de corrélation disponibles avec la matrice de corrélation présentée. En effet, celle-ci est obtenue à l'aide du package *PerformanceAnalytics* disponible avec le

logiciel RStudio. Celui-ci permet d'utiliser les coefficients de corrélation de Pearson, de Spearman ou de Kendall (celui-ci ne sera pas expliqué davantage). Le coefficient de Pearson mesure la corrélation linéaire entre deux variables continues tandis que le coefficient de Spearman mesure la liaison monotone entre deux variables. Le coefficient de Pearson est considéré comme une corrélation dite paramétrique, qui ne peut être appliqué qu'à condition que les variables suivent une loi normale alors que le coefficient de Spearman est un coefficient dit robuste car il s'applique plus largement puisqu'il ne nécessite pas que les variables soient distribuées selon une loi normale. On parle alors de corrélation non paramétrique (Département Informatique Université d'Angers, 2020; STHDA, 2020b).

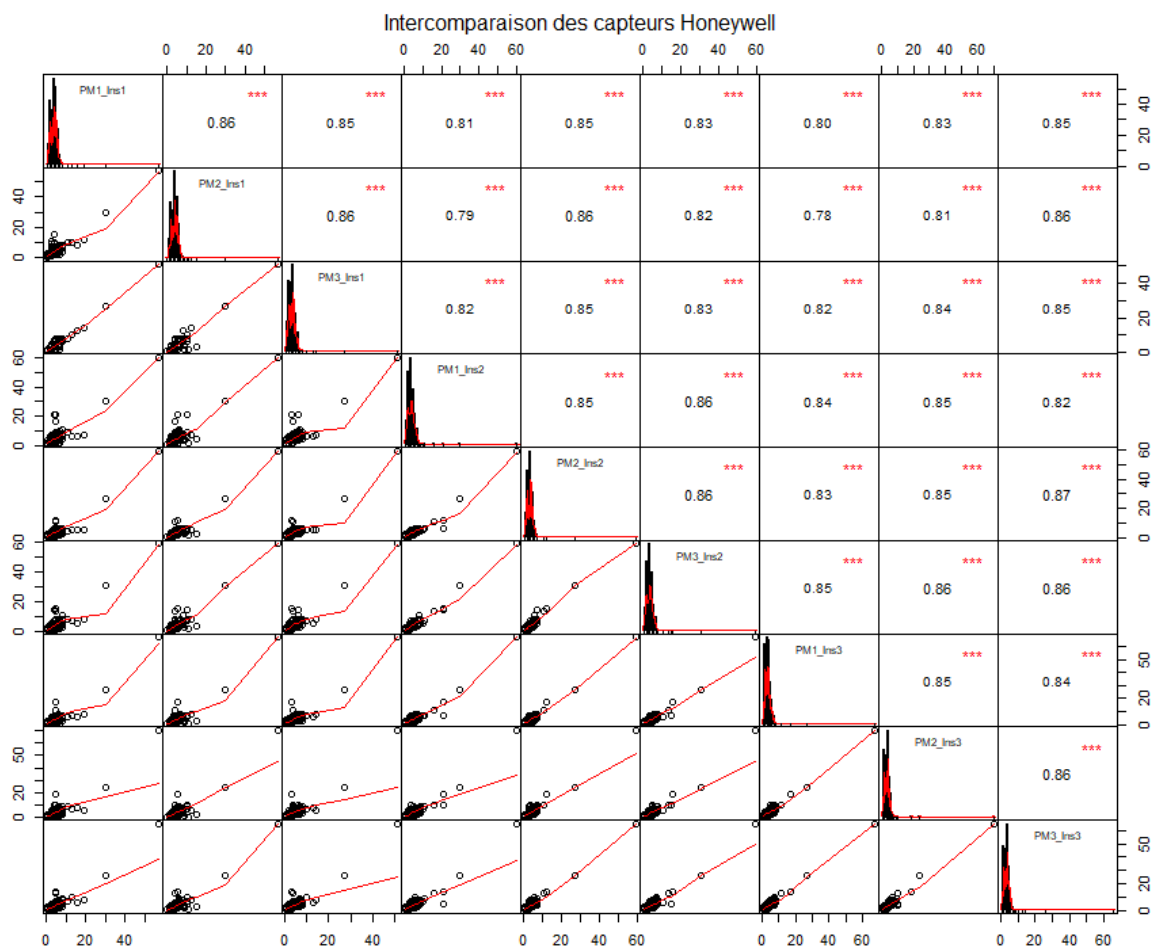


Figure 27 - Graphique de corrélation de Spearman entre les différents capteurs constituant les instruments (Etude d'inter-comparaison)

Le coefficient de Spearman en haut de la diagonale indique globalement une corrélation positive et un niveau de significativité important (nombre maximum d'étoiles). Cependant, les distributions reprises dans la diagonale et les courbes de tendance observées en-dessous de la diagonale sont influencées par les quelques valeurs élevées en concentration.

VII.3. Comparaison d'une station de référence durant la période de confinement et en période « traditionnelle »

Pour vérifier les tendances décrites pour les polluants en période de confinement, les données pour une station de référence ont été récupérées sur le site https://www.irceline.be/fr/qualite-de-lair/mesures/monitoring-stations/carte-interactif?set_language=fr avec l'outil de carte interactive. Les données des PM_{2,5} ont été sélectionnées pour la période du 1^{er} mars au 30 juin chaque année. La période sélectionnée débute un peu avant le début de la campagne de mesure des concentrations en PM_{2,5} autour de l'établissement scolaire à l'aide des instruments du SAM-ULiège et se termine un peu après.

Les données sont des données horaires mesurées à la station rurale d'Habay-la-Vieille (notée Habay par la suite) à l'aide du GRIMM EDM 180 qui a été présenté auparavant. L'objectif recherché ici est de comparer les concentrations mesurées ces dernières années et d'observer s'il existe des différences. L'intérêt sera particulièrement porté vers l'année 2020 pour laquelle un confinement a été mis en place.

Les données téléchargées, puisqu'elles correspondent à la même période d'étude, doivent avoir le même nombre d'informations (et donc le même nombre de lignes). Cependant, l'année 2019 présente la particularité de ne pas montrer de mesures effectuées du 26/05/2019 de 03:00:00 jusqu'au 27/05/2019 à 02:00:00. Cette période a été rajoutée manuellement dans le jeu de données en indiquant comme mesure « NA » pour effectuer les manipulations dans RStudio sur des tableaux présentant une même longueur.

Une fois ces quelques procédures réalisées, l'analyse a été effectuée sur 6 jeux de données dont le nombre d'observations est de 2927 lignes représentant des données horaires.

Les données téléchargées sont encodées en UTC, ce qui inclut un changement d'heure (passage de UTC+1 à UTC+2 le dernier week-end de mars en Belgique). Une correction manuelle des heures a dû être réalisée pour chaque année (le changement ne s'effectue pas à la même date chaque année). Une particularité supplémentaire dans les jeux de données téléchargés est que certaines concentrations sont indiquées en valeur négative. Ces concentrations négatives sont le résultat d'une courbe de calibration de la part de l'instrument de mesure. Elles ont été remplacées par 0 µg/m³.

La comparaison des concentrations mesurées à la station de référence en milieu rural d'Habay pour les années de 2015 à 2020 a été réalisée sur base des étapes suivantes :

- 1) Présentation des statistiques descriptives des données horaires d'Habay.
- 2) Réalisation de moyennes sur différentes périodes afin de présenter un graphique temporel le plus visuel possible ;
- 3) Réalisation de boxplots pour chaque année afin d'avoir une nouvelle représentation visuelle des distributions des concentrations en PM_{2,5} mesurées à Habay ;
- 4) Réalisation d'un test de comparaison des médianes 2 à 2 et représentation des distributions des variables testées afin de déterminer les conclusions du test statistique.

Le *Tableau 9* reprend les statistiques descriptives du jeu de donnée utilisé

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| Min. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1st Qu. | 2.7 | 2.2 | 1.7 | 2.7 | 0.7 | 0.7 |
| Median | 6.0 | 6.0 | 5.1 | 5.6 | 4.1 | 4.1 |
| Mean | 9.2 | 8.0 | 7.2 | 8.7 | 7.2 | 5.9 |
| 3rd Qu. | 11.6 | 11.4 | 9.9 | 11.8 | 9.9 | 8.5 |
| Max. | 70.3 | 53.4 | 52.9 | 76.1 | 45.2 | 43.3 |

Tableau 9 - Statistiques descriptives des concentrations horaires en PM_{2,5} mesurées à la station pour la période du 1^{er} mars au 30 juin des années 2015 à 2020. Concentrations en µg/m³.

Plusieurs observations peuvent être effectuées sur base du *Tableau 9*. Les médianes évoluent dans un sens décroissant selon le sens chronologique. La tendance est quasi la même pour la concentration moyenne annuelle hormis pour l'année 2018 où celle-ci est légèrement supérieure à la concentration de l'année 2017. Néanmoins, la concentration moyenne en PM_{2,5} à Habay est toujours inférieure à 10 µg/m³ pour la période considérée (du 1^{er} mars au 30 juin). L'intervalle entre les maxima et les

minimas semble diminuer au cours du temps. En effet, l'intervalle le plus petit correspond aux années 2019 et 2020.

Par souci de visibilité des données, un graphique temporel hebdomadaire a été réalisé (*Figure 28*). Le chiffre 5 en abscisse correspond à la 5^{ème} semaine sur laquelle les concentrations ont été moyennées pour la période de mesures (qui va du 1^{er} mars au 30 juin).

L'année 2020 (courbe rose) ne présente pas des pics aussi marqués que certaines autres années ce qui laisse penser que le confinement et les restrictions imposées par les autorités gouvernementales ont potentiellement eu un impact sur les concentrations PM_{2,5}.

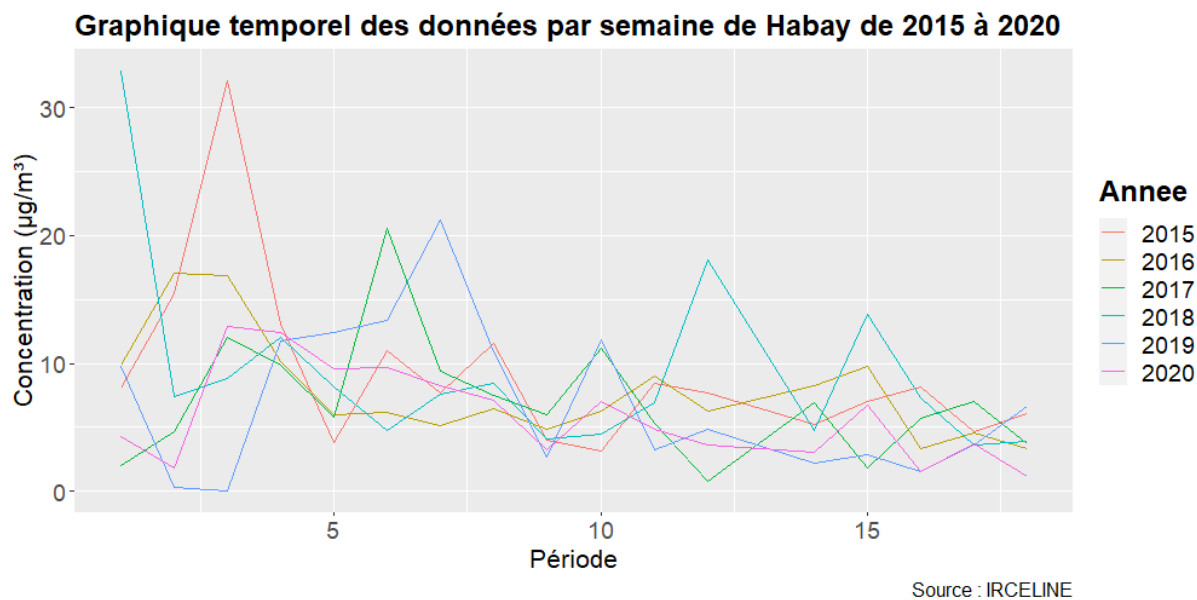


Figure 28 - Graphique temporel des concentrations moyennées par semaine en PM_{2,5} mesurées à la station d'Habay pour la période du 1^{er} mars au 30 juin des années 2015 à 2020. Les concentrations sont exprimées en µg/m³. Source : IRCELINE

Dans un second temps, il est intéressant de réaliser un boxplot (*Figure 29*) qui permet une autre représentation visuelle. Ce boxplot a été effectué en conservant les données par heure, aucune moyenne n'a été calculée pour le réaliser. Il est présenté sur la *Figure 28* de manière à avoir toutes les données représentées sur le graphique du haut et un zoom est effectué sur le graphique du bas pour la gamme de concentration de 0 à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De cette façon, la partie concernant la boîte est plus visible.

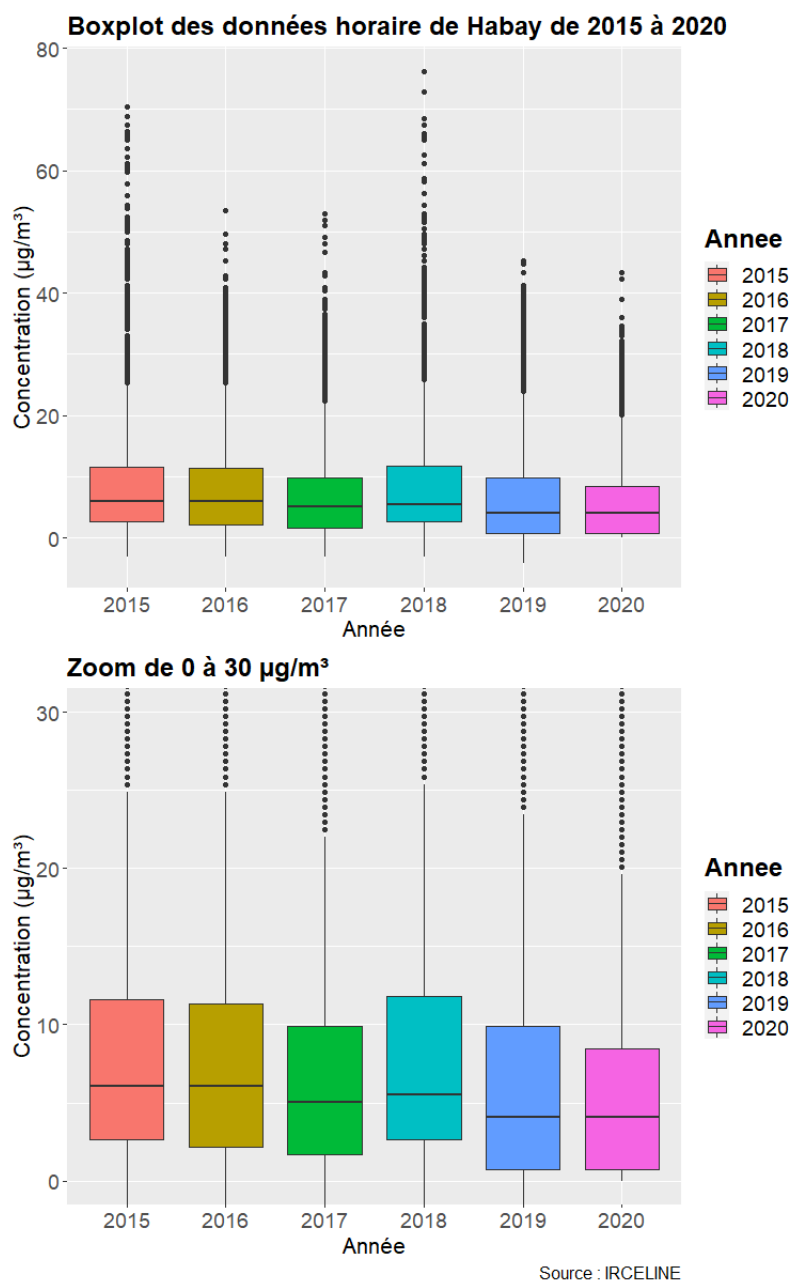


Figure 29 - Boxplot des concentrations horaires en $\text{PM}_{2,5}$ mesurées à la station d'Habay pour la période du 1^{er} mars au 30 juin des années 2015 à 2020. Les concentrations sont exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Source : IRCELINE

Les observations visuelles permettent de mettre en évidence les points suivants :

- Les médianes des années 2015, 2016 et 2018 sont proches ;
- Les médianes des années 2019 et 2020 sont proches ;

Avant d'effectuer le test statistique, les différentes distributions sont représentées sur un graphique (*Figure 30*) afin de voir si la condition n°3 du test statistique est respectée.

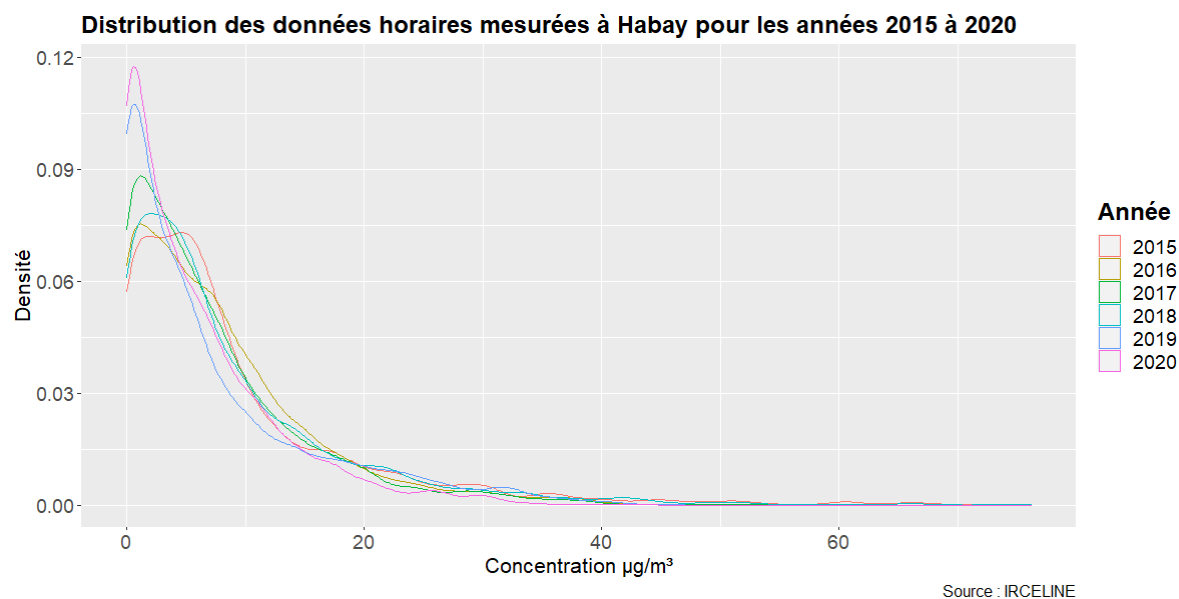


Figure 30 - Distribution des données horaires en $PM_{2,5}$ mesurées à la station d'Habay pour la période du 1er mars au 30 juin des années 2015 à 2020. Source : IRCELINE

Sur base du graphique (Figure 30), il est possible de dire que les concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées à Habay pour les années 2015 à 2020 (pour les périodes concernées) présentent des distributions similaires et le test statistique non-paramétrique peut permettre de tirer des conclusions sur les médianes et non sur des tendances. Les résultats de ce test sont présentés dans le Tableau 10.

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|------|----------|---------|----------|---------|---------|
| 2016 | 0.20963 | - | - | - | - |
| 2017 | 2.30e-08 | 0.00043 | - | - | - |
| 2018 | 0.23021 | 0.60789 | 6.50e-05 | - | - |
| 2019 | < 2e-16 | < 2e-16 | 8.50e-07 | < 2e-16 | - |
| 2020 | < 2e-16 | < 2e-16 | 1.40e-13 | < 2e-16 | 0.20963 |

Tableau 10 - Tableau des p-values résultantes du test de statistique non-paramétrique de Wilcoxon pour les concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées à la station d'Habay pour la période du 1er mars au 30 juin des années 2015 à 2020.

Avec ces résultats, les valeurs mises en surbrillance indiquent un non-rejet de H_0 (conclusion d'une p-value supérieure à 0.05), ce qui signifie que les médianes ne sont pas significativement différentes et qu'elles peuvent être considérées comme identiques dans la population visée. Dès lors, la médiane de l'année 2015 n'est pas significativement différente des années 2016 et 2018. La médiane de l'année 2016 n'est pas significativement différente de l'année 2018. La médiane de l'année 2019 n'est pas significativement différente de l'année 2020.

Cette absence de différence significative traduit que ces années peuvent être considérées comme identiques sur la période considérée et que les différences observées sont dues à la fluctuation d'échantillonnage. Ces tests permettent de confirmer les observations réalisées au préalable sur le graphique (Figure 29). L'année 2015 présente une médiane identique à celle des années 2016 et 2018 sur la période étudiée puisque la p-value corrigée par la méthode de Holm obtenue par le test statistique est supérieure à 0.05. L'année 2016 présente une médiane identique à celle de l'année 2018 sur base du même principe de valeur de p-value du test statistique non-paramétrique. Enfin, l'année 2019 présente une médiane identique à celle de l'année 2020 en raison de la valeur de la p-value obtenue. Les différences entre les médianes observées ne sont donc pas significatives et elles sont uniquement dues à la fluctuation d'échantillonnage. A ce titre, rien ne permet de réfuter que les médianes de ces 2 échantillons sont identiques dans la population visée et donc que d'un point de vue statistique, l'année 2020, caractérisée par une série de restrictions gouvernementales liées à la pandémie de covid-19, ne permet pas une réduction (ou une augmentation puisqu'il s'agit d'un test bilatéral) des concentrations en $PM_{2,5}$ significative.

VII.4. Comparaison Habay 2020 et Arlon 2020

Dans la continuité du point précédent, il est intéressant de comparer les concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées à Habay, une station rurale, à l'aide d'un instrument haute performance et les concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées à l'aide de capteurs low-cost dans les 3 rues entourant l'établissement scolaire qui sont situées en milieu urbain pour l'année 2020. Puisque l'année 2020 est marquée par un confinement, est-ce que la situation observée en milieu rural est la même que celle en milieu urbain ?

Le jeu de données concernant les concentrations en $PM_{2,5}$ dans les 3 rues entourant l'établissement scolaire résultant de la campagne de mesure avec les capteurs low-cost sont des données par minute. Les données d'Habay 2020 sont des données horaires comme expliqué au point VII.3. Pour pouvoir mettre en relation ces 2 jeux de données, il est nécessaire de réaliser une moyenne horaire avec les données d'Arlon. Une fois cette étape préparatoire réalisée et que le jeu de données d'Habay a lui aussi été préparé comme expliqué auparavant, il est possible de débiter le traitement de données. Les jeux de données ne sont pas de même dimension puisque les données d'Habay sont des données en continu alors qu'à Arlon il s'agit de données dépendant de la batterie des instruments du SAM-ULiège. Les périodes de mesure sont respectivement du 1^{er} mars au 30 juin pour Habay tandis que les données concernant Arlon s'étendent de mi-mars à fin juin de manière discontinue.

Dans un premier temps, les statistiques descriptives concernant les différentes variables étudiées pour cette partie (à savoir les concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées à Habay et celles mesurées dans les 3 rues à Arlon et moyennées par période d'1 heure, périodes considérées : mesures à Habay) sont présentées dans le *Tableau 11* ($n = 2927$). Les mesures à Habay étant effectuées de manière continue, les périodes manquantes pour Arlon sont remplacées par des NA's.

| | Habay [$\mu g/m^3$] | Casino [$\mu g/m^3$] | Netzer [$\mu g/m^3$] | Tesch [$\mu g/m^3$] |
|---------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Min | 0.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| 1st Qu. | 0.7 | 4.1 | 4.3 | 3.6 |
| Median | 4.1 | 6.6 | 6.8 | 6.2 |
| Mean | 5.9 | 8.5 | 8.4 | 7.7 |
| 3rd Qu. | 8.5 | 10.8 | 10.1 | 9.8 |
| Max | 43.3 | 48.1 | 36.8 | 40.7 |
| NA's | 9 | 2519 | 2554 | 2550 |

Tableau 11 - Statistiques descriptives des concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées à la station d'Habay et dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude pour l'année 2020. Concentrations en $\mu g/m^3$.

Le *Tableau 11* indique que les concentrations observées en $PM_{2,5}$ à Habay sont en moyenne légèrement moins importantes que celles mesurées à Arlon. Cette observation peut être expliquée par le fait que les concentrations mesurées à Arlon sont situées dans le centre urbain et qu'Habay représente un site rural. Malgré cette différence de concentration moyenne, la rue Joseph Netzer et l'Avenue Victor Tesch affichent des concentrations maximales légèrement inférieures à celle d'Habay pour la période considérée.

Un graphique de corrélation (*Figure 31*) a été réalisé pour chaque paire de sites. Sur les mêmes fondements qu'expliqué au point VII.2., celui-ci est réalisé en privilégiant le coefficient de corrélation de Spearman. Il indique des corrélations positives entre les variables. Ceci peut se traduire par le fait que lorsque la concentration mesurée en $PM_{2,5}$ augmente à Habay alors, la concentration mesurée en $PM_{2,5}$ à Arlon augmente également.

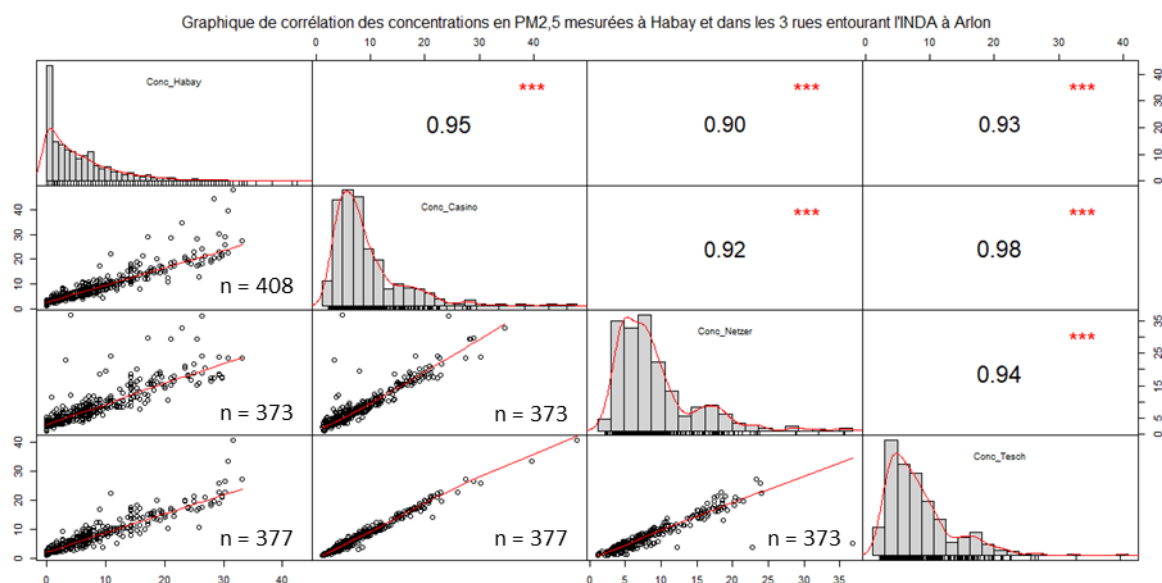


Figure 31 - Graphique de corrélation de Spearman entre les concentrations horaires en PM_{2,5} mesurées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station d'Habay et dans les rues autour de l'INDA pour la période d'étude au cours de l'année 2020.

La Figure 32 représente un boxplot comparant les échantillons des concentrations en PM_{2,5} mesurées à Arlon et à Habay.

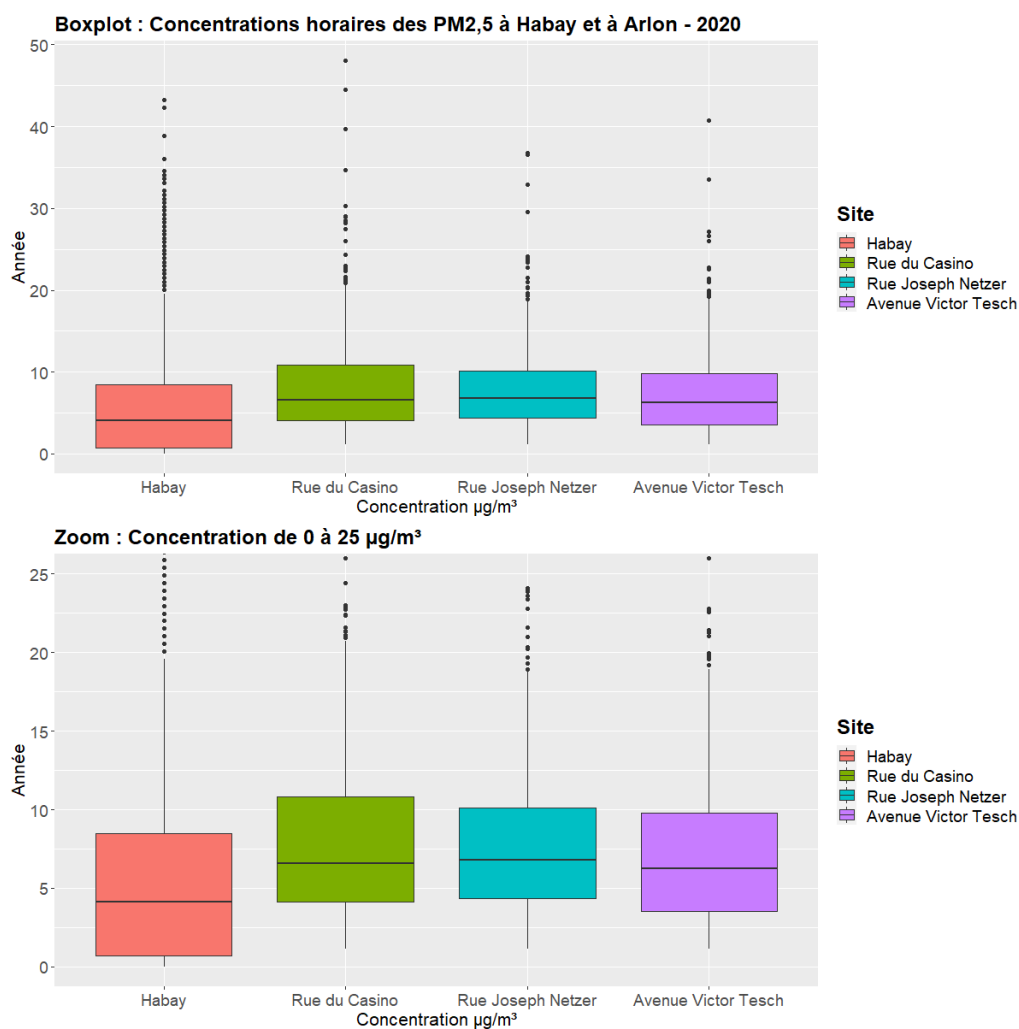


Figure 32 - Boxplot des concentrations horaires en PM_{2,5} mesurées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station d'Habay et dans les rues autour de l'INDA pour la période d'étude au cours de l'année 2020.

Il est facilement observable sur la *Figure 32* que la rue du Casino, la rue Joseph Netzer et l'Avenue Victor Tesch semblent présenter des médianes proches. L'intervalle 25-75% est relativement similaire lui aussi avec la particularité qu'il présente des concentrations un peu plus élevées pour la Rue du Casino. L'échantillon d'Habay quant à lui présente une médiane inférieure à celles des 3 autres rues.

La *Figure 32* représente la distribution des données horaires à Habay ainsi que dans les 3 rues à Arlon situées autour de l'établissement scolaire. Les distributions sont similaires pour les 3 rues à Arlon mais la distribution des données pour l'échantillon d'Habay est différente. Avec ce type de distributions, il est possible de raisonner sur la médiane concernant les conclusions du test statistique non-paramétrique pour les 3 rues d'Arlon mais il est préférable de raisonner sur les tendances lorsque c'est l'échantillon d'Habay et d'Arlon qui sont comparés.

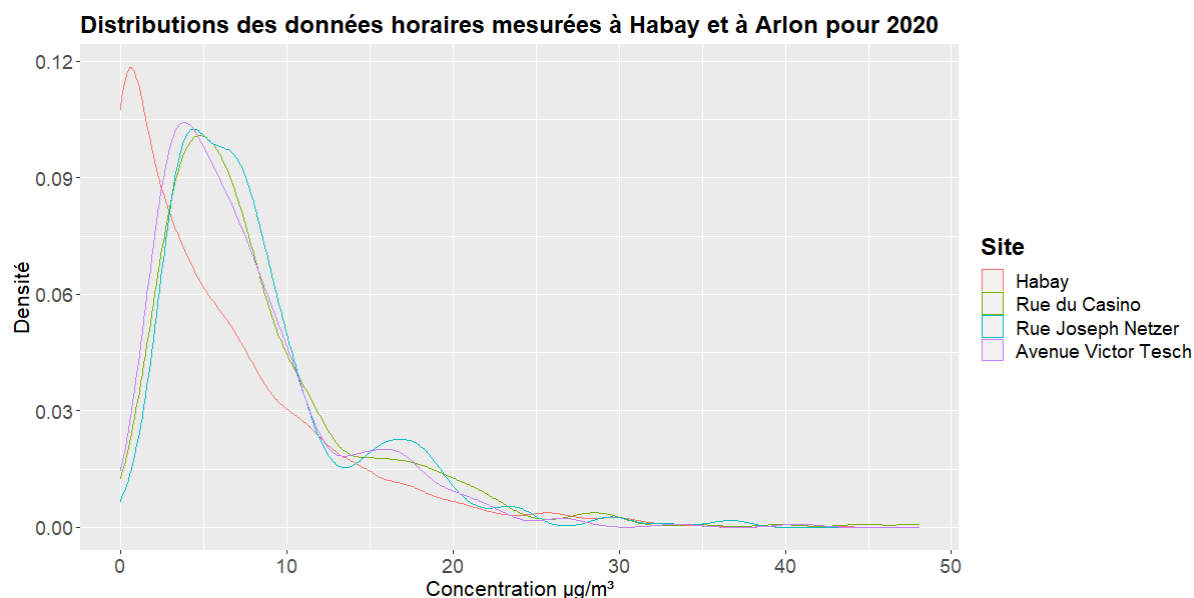


Figure 33 - Distribution des concentrations horaires en $PM_{2,5}$ mesurées en $\mu g/m^3$ à la station d'Habay et dans les rues autour de l'INDA pour la période d'étude au cours de l'année 2020.

Le *Tableau 12* reprend les informations résultant du test de Wilcoxon.

| | Habay | Rue du Casino | Rue Joseph Netzer |
|---------------------|--------|---------------|-------------------|
| Rue du Casino | <2e-16 | - | - |
| Rue Joseph Netzer | <2e-16 | 0.55 | - |
| Avenue Victor Tesch | <2e-16 | 0.169 | 0.058 |

Tableau 12 - Tableau des p -values résultantes du test de statistique non-paramétrique de Wilcoxon pour les concentrations horaires en $PM_{2,5}$ mesurées à la station d'Habay et dans les rues autour de l'INDA pour la période d'étude au cours de l'année 2020.

Au vu de ces résultats, les fluctuations d'échantillonnage ne suffisent pas pour expliquer la différence observée dans les tendances entre Habay et Arlon (p -value < 0.05). Cependant, concernant les rues à Arlon, puisque la p -value > 0.05, les différences entre les médianes observées ne sont pas significatives et celles-ci ne semblent dues qu'à la fluctuation d'échantillonnage et rien ne permet de réfuter que les médianes sont identiques dans la population visée pour Arlon durant la même période.

VII.5. Analyse du trafic de 2020

Accompagnant le placement des instruments construits sur base de capteurs low-cost autour de l'école, des compteurs radars appartenant à l'ISSEP ont pu être placés autour de celle-ci. De plus amples informations sur ceux-ci sont reprises au *point VI.1.5*. Il a été décidé, à l'aide des informations récoltées grâce à ces compteurs radars, de représenter l'état du trafic en fonction des différentes phases correspondant aux mesures prises par les autorités gouvernementales par rapport à la pandémie de coronavirus. Les périodes dont il est question sont représentées sur la ligne du temps présentée à la *Figure 1* et celles-ci sont décrites plus largement dans le *point I*. Les périodes retenues correspondent à :

- Conf1 : Période de confinement du 18/03/2020 au 14/04/2020 ;
- Conf2 : Période de confinement mais réouverture des bricolages à partir du 15/04/2020. La période s'étend du 15/04/2020 au 03/05/2020 ;
- P1A : Phase 1A du plan de déconfinement du 04/05/2020 au 10/05/2020 ;
- P1B : Phase 1B du plan de déconfinement du 11/05/2020 au 17/05/2020 ;
- P2 : Phase 2 du plan de déconfinement du 18/05/2020 au 07/06/2020 ;
- P3 : Phase 3 du plan de déconfinement du 08/06/2020 au 14/06/2020 ;
- P4 : Phase dénommée 4 correspondant à la réouverture des frontières.

Il est attendu d'observer une augmentation du trafic au fur et à mesure des périodes où le confinement est levé, notamment par la reprise de différents secteurs du travail. Les particularités de ces périodes ont été largement décrites dans la partie I. de ce travail.

Le traitement de données est réalisé sur les périodes communes de mesure aux 3 rues.

Les *tableaux 13 et 14* reprennent les statistiques descriptives de la data du trafic pour 2020.

| | Période : Conf 1 | | | Période : Conf 2 | | | Période : P1A | | | Période : P1B | | |
|---------|------------------|---------------|--------------|------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch |
| Min. | 74 | 550 | 567 | 73 | 662 | 697 | 99 | 1692 | 1295 | 117 | 1719 | 1261 |
| 1st Qu. | 114.2 | 1454 | 1476 | 117 | 1918 | 1969 | 174.5 | 2996 | 2810 | 225 | 3384 | 2574 |
| Median | 172 | 1830 | 1884 | 164 | 2216 | 2215 | 230 | 3240 | 3059 | 253 | 3834 | 2920 |
| Mean | 149 | 1628 | 1696 | 153 | 2039 | 2021 | 205 | 3008 | 2807 | 232 | 3429 | 2822 |
| 3rd Qu. | 181.8 | 1885 | 1991 | 188.5 | 2485 | 2400 | 243 | 3268 | 3100 | 261.5 | 3879 | 3470 |
| Max. | 194 | 2347 | 2403 | 250 | 3113 | 3258 | 271 | 3600 | 3475 | 284 | 3922 | 3489 |
| NA's | | | | 2 | | | | | | | | |

Tableau 13 - Statistiques descriptives des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude (de la période Conf1 à la période P1B) pour l'année 2020. Les données s'expriment en nombre de voitures par jour.

| | Période : P2 | | | Période : P3 | | | Période : P4 | | |
|---------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch |
| Min. | 101 | 1694 | 1307 | 153 | 2375 | 2012 | 148 | 2177 | 1797 |
| 1st Qu. | 156 | 2405 | 2147 | 365 | 4805 | 4596 | 218 | 4054 | 4016 |
| Median | 207 | 3401 | 3150 | 500 | 5169 | 5202 | 323 | 4782 | 4985 |
| Mean | 255 | 3523 | 3232 | 450 | 4811 | 4807 | 324 | 4707 | 4498 |
| 3rd Qu. | 378 | 4815 | 4642 | 545 | 5366 | 5380 | 354 | 5498 | 5115 |
| Max. | 495 | 5293 | 5395 | 680 | 5789 | 6483 | 556 | 7427 | 5520 |
| NA's | | | 2 | | | | 9 | 8 | 9 |

Tableau 14 - Statistiques descriptives des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude (de la période P2 à la période P4) pour l'année 2020. Les données s'expriment en nombre de véhicules par jour.

L'intensité du trafic de la rue du Casino est largement inférieure à celle de la rue Joseph Netzer et de l'Avenue Victor Tesch et ce indépendamment des périodes décisionnelles des autorités gouvernementales en rapport de la pandémie de covid-19 de 2020. De manière générale, l'hypothèse de départ formulant une augmentation de l'intensité de trafic avec l'avancement dans les mesures liées au confinement (et surtout pour le déconfinement à partir de la phase 1A) est vérifiée par les résultats pratiques. En effet, on voit globalement que l'intensité de trafic augmente suivant les périodes de confinement/déconfinement. Il y a tout de même une exception concernant la période 4 correspondant à l'ouverture des frontières où l'intensité du trafic est moins importante que pour la période 3.

Pour permettre une visualisation plus aisée des données trafic pour l'année 2020, un graphique temporel a été réalisée pour lequel le nombre de véhicules a été sommé sur 24h (*Figure 34*). L'absence

de mesures est dû à l'autonomie des batteries intégrées aux compteurs radars, le remplacement de batterie ne s'effectuait pas de manière immédiate. Les périodes considérées sont représentées par des traits verticaux. Suite à la faible intensité du trafic est pour la rue du Casino, un zoom a été effectué allant de 0 à 700 véhicules/jour (Figure 35). Enfin, il y a des chutes d'intensité pour le trafic qui se répètent de manière régulière. Ces chutes correspondent aux dimanches pour lesquels le trafic est fortement réduit.

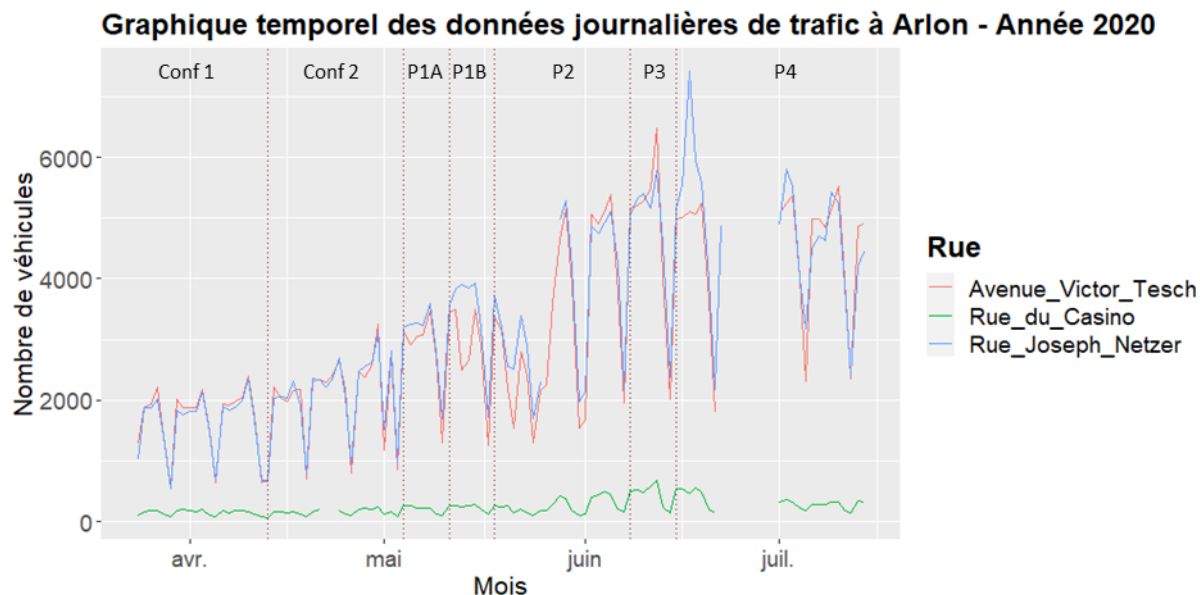


Figure 34 - Graphique temporel des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude découpée dans le sens vertical en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020. Les données s'expriment en nombre de véhicules par jour.

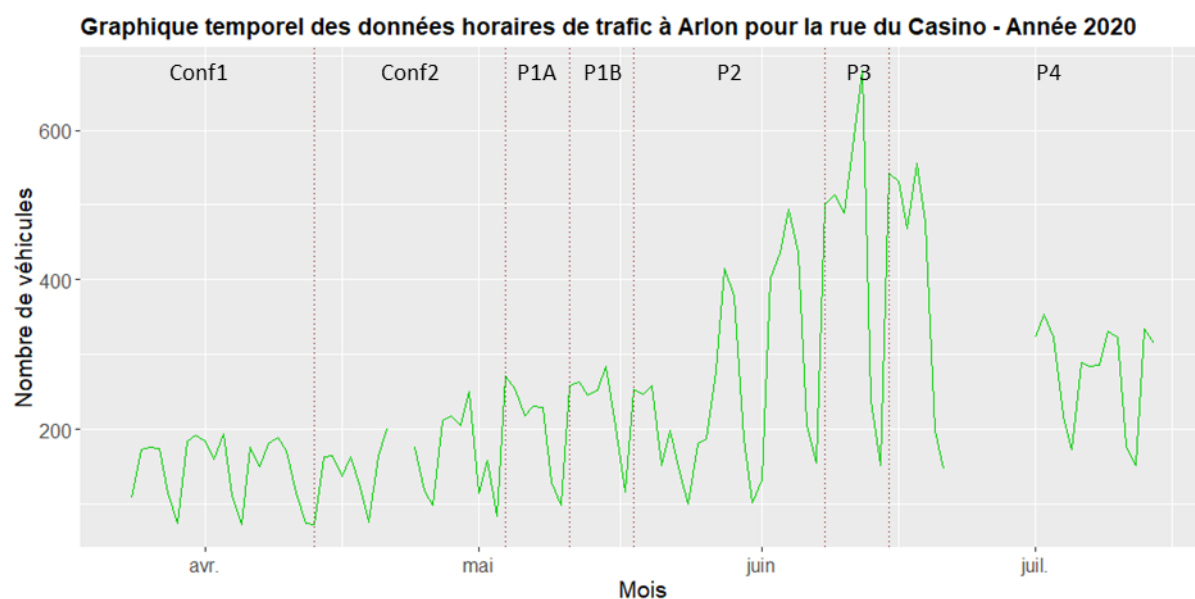


Figure 35 - Graphique temporel des données trafic mesurées dans la rue du Casino autour de l'INDA durant la période d'étude découpée dans le sens vertical en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020. Les données s'expriment en nombre de véhicules par jour.

Pour accompagner la représentation temporelle, des boxplots ont été réalisés et sont repris en Figure 36, 37 et 38. La Figure 36 est réalisée en fonction des périodes et les boxplots, caractérisant les 3 rues, sont positionnés l'un à côté de l'autre. Un zoom est effectué pour la rue du Casino (en bas de la Figure 36) caractérisée par une gamme d'intensité de trafic différente que pour la rue Joseph Netzer et l'avenue Victor Tesch. La Figure 37 est une représentation pour laquelle les rues sont séparées et les périodes sont représentés pour chaque rue. La Figure 38 correspond à la même représentation qu'auparavant

mais pour la gamme d'intensité de trafic caractéristique pour la rue du Casino. Sur ceux-ci, il est possible de tirer certaines informations de ces représentations visuelles telles que :

- Il y a une augmentation de l'intensité de trafic au fur et à mesure des périodes sauf pour la période 4 qui présente une intensité de trafic inférieure à la période 3 et ce pour toutes les rues ;
- Les boîtes à moustache concernant la période 2 présentent un intervalle plus large que les intervalles pour les autres périodes. Ceci s'explique notamment parce que la période 2 est constituée de jours avec une très grande activité (plus de 4500 voitures pour les rues fortement fréquentées) mais aussi certaines journées avec des intensités de trafic très faibles (il y a de nombreux dimanches pour cette période qui sont marqués par des intensités très faibles mais il y a aussi le lundi 1^{er} juin qui était un jour férié lors de l'année 2020. Ce lundi a été marqué par une intensité de l'ordre d'un dimanche ~ 1500 véhicules alors qu'il s'agit d'une journée pour une semaine dont la moyenne de véhicules pour les jours ouvrables est supérieure à 4500 véhicules) ;
- Le « comportement » des rues peut être regroupé comme rue fréquentée pour l'avenue Victor Tesch et la rue Joseph Netzer et de rue calme pour la rue du Casino ;

Représentation avec les 3 rues l'une à côté de l'autre

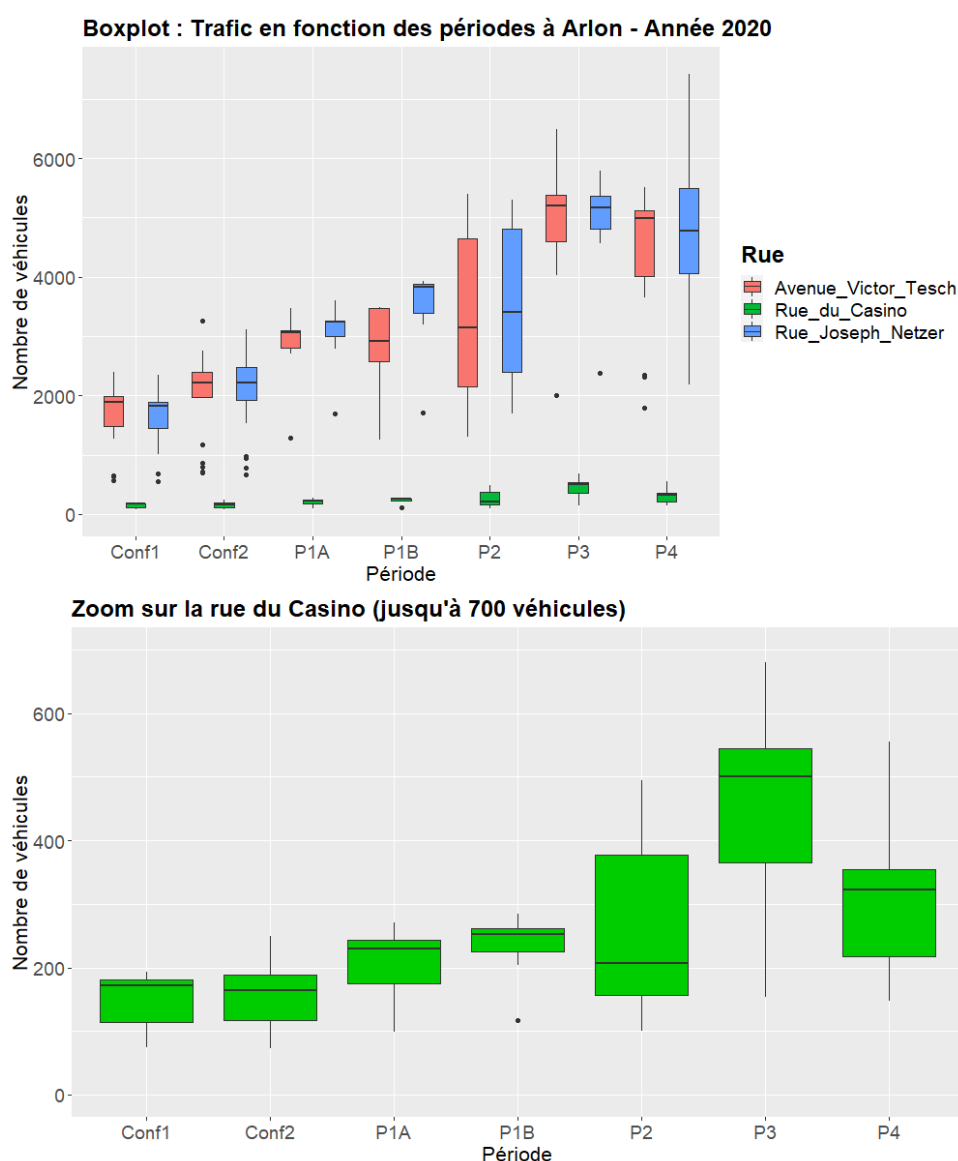


Figure 36 – (En haut) Boxplot des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.
(En bas) Boxplot des données trafic mesurées dans la rue du Casino autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.
Les données s'expriment en nombre de véhicules par jour.

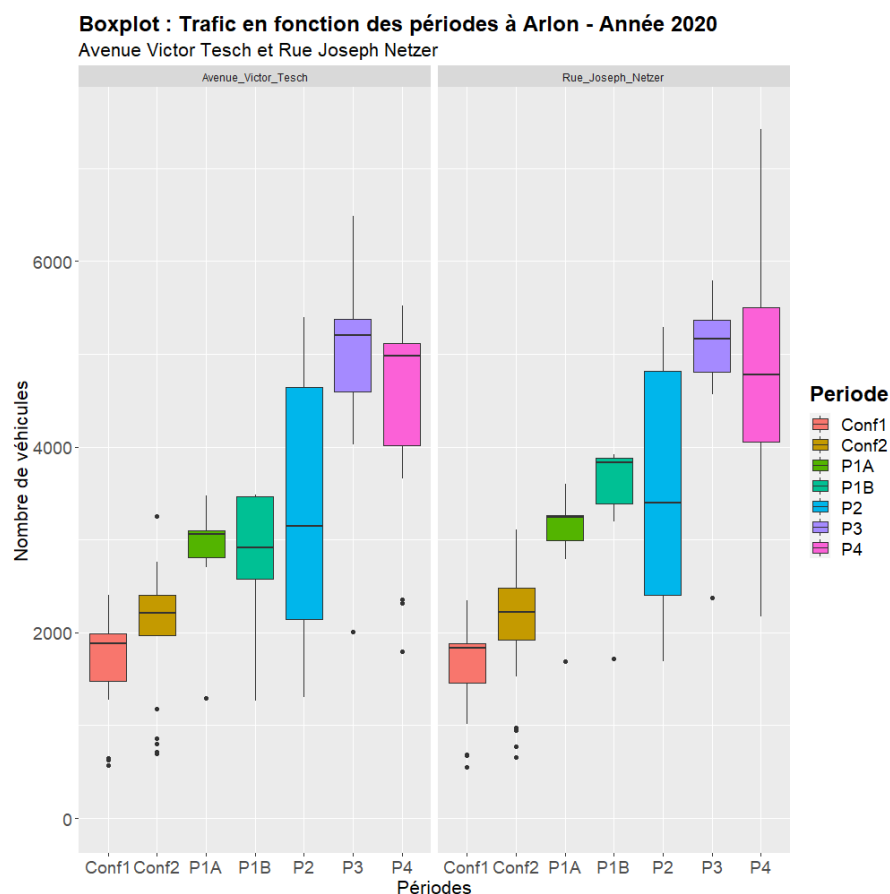


Figure 37 - Boxplot des données trafic mesurées dans la rue Joseph Netzer et l'Avenue Victor Tesch autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.

Boxplot en format wrap en fonction des rues.

Les données s'expriment en nombre de véhicules par jour.

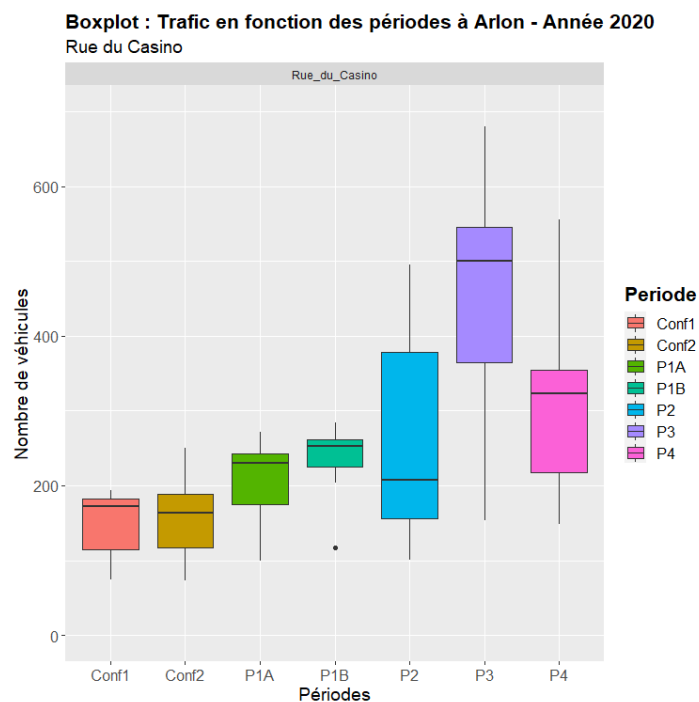


Figure 38 - Boxplot des données trafic mesurées dans la rue du Casino autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.

Les données s'expriment en nombre de véhicules par jour.

Deux formes de distributions sont représentées sur les *Figures 39 et 40*. La première représentation (*Figure 39*) consiste à illustrer la distribution des données des 3 rues selon la période caractérisant la situation de confinement/déconfinement et des contraintes formulées par les autorités gouvernementales afin d'endiguer la pandémie de covid-19. La seconde représentation (*Figure 40*) illustre la distribution des données des périodes en fonction des 3 rues.

Au vu de la complexité de ces distributions, il est plus judicieux de conclure les hypothèses du test sur base de tendances plutôt que sur base de médianes car ces distributions ne sont pas toutes similaires entre elles.



Figure 39 - Distribution des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.

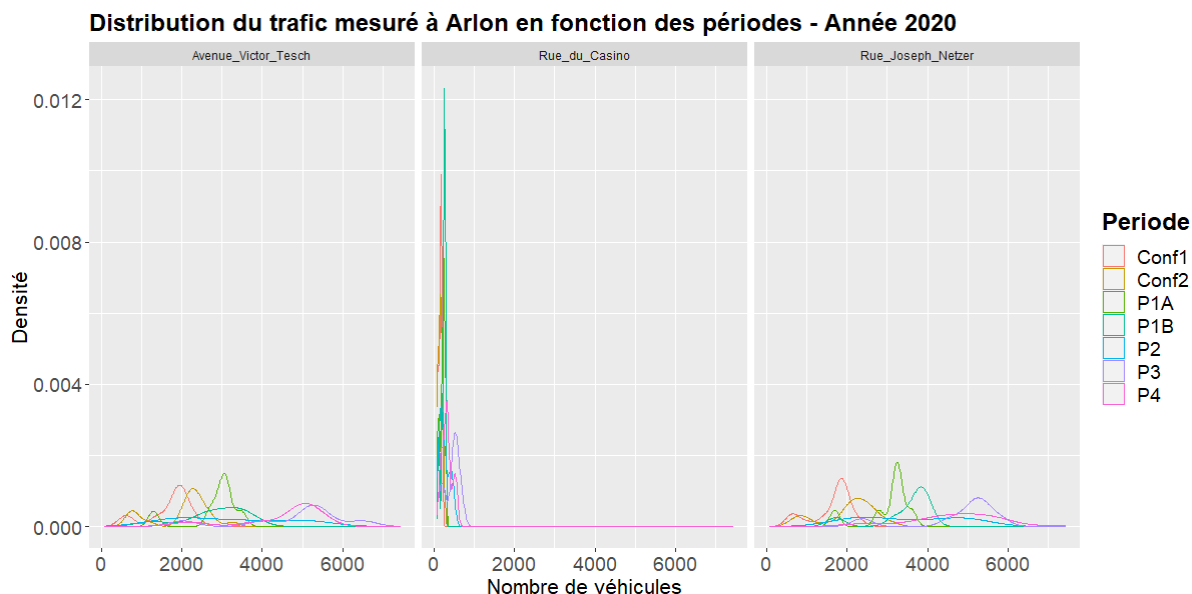


Figure 40 - Distribution des données trafic mesurées selon les phases liées au confinement pour l'année 2020 dans les rues autour de l'INDA.

Enfin, la dernière étape dans la méthodologie appliquée jusqu'à présent est la réalisation d'un test statistique de type non-paramétrique permettant de comparer les médianes ou en l'occurrence ici, les tendances, puisque les distributions sont particulièrement complexes.

Pour la réalisation de ce test statistique, une particularité a été observée. En effet, le test utilisé est le test des rangs signés de Wilcoxon et il repose sur une procédure consistant à ordonner les observations selon des rangs et ce, pour chaque variable. Lorsque la fonction « *pairwise.wilcox.test* » est lancée par

la console de Rstudio, un message d'erreur apparaît (*Figure 41*). Celui-ci est le résultat de l'organisation en rangs par le test utilisé. Lors de l'interprétation des résultats générés à l'aide de cette fonction, il est observé que certaines p-valeurs prennent des valeurs supérieures à 0.05 ce qui se traduit, de la même façon que précédemment, par un non rejet de l'hypothèse nulle et donc une conclusion de tendances observées qui ne sont pas significativement différentes et dont les différences seraient dues uniquement à la fluctuation d'échantillonnage. Cette conclusion conduit à estimer que les tendances sont identiques entre les échantillons présentant une telle valeur de p-value au sein de la population visée. Cependant, ce genre de résultats s'appliquait notamment pour la rue Joseph Netzer et l'Avenue Victor Tesch concernant les périodes P1A et P3. Il est clair que ce résultat n'est pas valable lorsque le graphique (*Figure 37*) est observé.

```
Warning message:
In wilcox.test.default(xi, xj, paired = paired, ...) :
  impossible de calculer la p-value exacte avec des ex-aequos
```

Figure 41 - Capture d'écran de la console du logiciel RStudio indiquant une erreur de calcul de la p-value exacte en présence d'ex-aequos dans les rangs pour le test de Wilcoxon.

Pour contrer ce problème d'ex-aequo (manipulation décrite dans le livre de statistiques de Gaël Millot), il a été nécessaire de remettre en forme le jeu de données et de passer par le même test qui s'effectue en comparant 2 valeurs de la variable qualitative à 2. Il est donc nécessaire d'isoler les observations caractérisant chaque valeur de la variable qualitative. Dans le cadre de l'analyse du trafic 2020, il existe 21 valeurs de la variable qualitative possibles. En effet, celle-ci est le résultat du regroupement de 2 autres variables qualitative qui sont la rue (qui peut prendre 3 valeurs à savoir rue Joseph Netzer, rue du Casino et Avenue Victor Tesch) et la période (qui peut prendre 7 valeurs décrites auparavant). Le résultat généré par cette méthode est beaucoup plus conséquent, il s'agit d'un tableau Excel de 5 colonnes sur 210 lignes repris en Annexe 9 de ce document. Ce tableau donne en colonne 4 la valeur de la p-value non corrigée et en colonne 5 la valeur de la p-value corrigée. La p-value corrigée présente les mêmes résultats aberrants que ceux mentionnés auparavant mais ce n'est pas le cas de la p-value non corrigée. Dès lors, pour la suite de l'analyse du trafic 2020, c'est sur base de la valeur de la p-value non corrigée du test statistique que les conclusions du test seront formulées.

Les résultats de l'Annexe 9 sont synthétisés selon 3 catégories. La première correspond à des rues différentes dont la p-value est supérieure à 0.05 pour une même période (*Tableau 15*). La seconde catégorie reprend les périodes qui ont obtenu une p-value supérieure à 0.05 pour une même rue (*Tableau 16*). Enfin, la dernière catégorie indique les situations où une période caractérisant une rue montre une p-value supérieure à 0.05 vis-à-vis d'une autre période et d'une autre rue (*Tableau 17*).

| Période | Rue 1 | Rue 2 |
|---------|---------------------|-------------------|
| Conf1 | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |
| Conf2 | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |
| P1A | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |
| P1B | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |
| P2 | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |
| P3 | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |
| P4 | Avenue Victor Tesch | Rue Joseph Netzer |

Tableau 15 – Tableau indiquant les paires de valeurs de la variable qualitative combinée pour lesquelles la p-value est supérieure à 0.05 lorsque la période est identique.

Le *Tableau 15* indique que l'Avenue Victor Tesch et la rue Joseph Netzer une p-value supérieure à 0.05 pour chaque période identique. Cela traduit le fait que les tendances pour le trafic (il n'est pas possible de conclure le test statistique sur base des médianes au vu de la complexité des distributions) sont identiques pour les 2 rues au cours d'une même période pour l'année 2020 durant la période de mesure avec les compteurs radars (phases de confinement/déconfinement réglementées par les autorités gouvernementales). Ces échantillons semblent effectivement appartenir à la même population pour les mêmes périodes. De manière visuelle, le boxplot (*Figure 36 – en haut*) semble indiquer les mêmes résultats que le test statistique pour ces 2 rues à l'exception de la période P1B qui semble malgré tout différente.

Le *Tableau 16* permet quant à lui de conclure le test statistique pour une même rue au cours de périodes différentes. Comme le tableau précédent l'a indiqué, l'Avenue Victor Tesch et la rue Joseph Netzer sont des rues qui semblent être issues d'une même population. La même tendance est observée ici puisque ce sont les mêmes périodes qui présentent les p-values supérieures à 0.05 à savoir la période P1A avec P1B, P1A avec P2, P1B avec P2 et enfin P3 avec P4. C'est-à-dire que seule la période 2 avec la période 3 ne présente pas de p-value supérieure à 0.05. C'est-à-dire que la période 1A, la période 1B et la période 2 pour ces rues semblent provenir d'un même échantillon d'intensité de trafic puisque la p-value indique le non rejet de H_0 permettant de conclure que les différences dans les tendances ne sont pas significatives et sont dues uniquement à la fluctuation d'échantillonnage. D'un point de vue visuel sur le boxplot (*Figure 38*), la tendance peut être confirmée pour la période P1A, P1B et P2 cependant les échantillons de données concernant l'intensité trafic pour P3 et P4 semblent tout de même bien différent.

Concernant la rue du Casino, celle-ci présente une p-value supérieure à 0.05 pour de nombreuses périodes testées entre elles. Dans ce cas, les échantillons des périodes en questions sont considérés comme identiques et les différences entre les tendances observées ne sont pas significatives et semblent uniquement dues aux fluctuations d'échantillonnage. Cependant, il est observable sur le boxplot (*Figure 38*), les périodes 2, 3 et 4 semblent bien différentes alors que le résultat du test significatif tend à conclure qu'il s'agit d'échantillons issus d'une population identique.

| Rue | Période 1 | Période 2 |
|---------------------|-----------|-----------|
| Rue du Casino | Conf1 | Conf2 |
| Rue du Casino | P1A | P1B |
| Rue du Casino | P1A | P2 |
| Rue du Casino | P1B | P2 |
| Rue du Casino | P1B | P3 |
| Rue du Casino | P2 | P4 |
| Rue du Casino | P3 | P4 |
| Avenue Victor Tesch | P1A | P1B |
| Avenue Victor Tesch | P1A | P2 |
| Avenue Victor Tesch | P1B | P2 |
| Avenue Victor Tesch | P3 | P4 |
| Rue Joseph Netzer | P1A | P1B |
| Rue Joseph Netzer | P1A | P2 |
| Rue Joseph Netzer | P1B | P2 |
| Rue Joseph Netzer | P3 | P4 |

Tableau 16 - Tableau indiquant les paires de valeurs de la variable qualitative combinée pour lesquelles la p-value est supérieure à 0.05 lorsque la rue est identique.

Sur base de ces constatations, il y a donc lieu de s'interroger concernant la manipulation réalisée pour éviter le problème des ex-aequos dans les rangs et le fait de se baser sur une p-value non corrigée puisque celle corrigée semblait présenter les mêmes défauts que la situation initiale. En effet, les résultats du test statistique semblent en désaccord avec les représentations visuelles type boxplot, il faut donc interpréter ces résultats avec précaution.

Le *Tableau 17* regroupe les quelques situations où certains échantillons correspondant à l'intensité de trafic d'une rue en particulier au cours d'une période semble issue de la même population qu'un autre échantillon d'intensité trafic d'une autre rue au cours d'une autre période. Si les observations réalisées auparavant entre l'Avenue Victor Tesch et la Rue Joseph Netzer se confirment, ce sont ces rues et les périodes correspondantes qui doivent y figurer. Néanmoins, il est observé malgré tout des différences visuelles à l'aide du boxplot (*Figure XX*) par rapport aux résultats du test statistique.

| Période 1 | Rue 1 | Période 2 | Rue 2 |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| P1A | Avenue Victor Tesch | P2 | Rue Joseph Netzer |
| P1A | Rue Joseph Netzer | P1B | Avenue Victor Tesch |
| P1A | Rue Joseph Netzer | P2 | Avenue Victor Tesch |
| P1B | Avenue Victor Tesch | P2 | Rue Joseph Netzer |
| P1B | Rue Joseph Netzer | P2 | Avenue Victor Tesch |
| P3 | Avenue Victor Tesch | P4 | Rue Joseph Netzer |
| P3 | Rue Joseph Netzer | P4 | Avenue Victor Tesch |

Tableau 17 - Tableau indiquant les paires de valeurs de la variable qualitative combinée pour lesquelles la p-value est supérieure à 0.05 lorsque la rue et la période sont différentes.

La conclusion pour cette partie de résultats est difficile à la fois parce que les variables qualitatives prennent de nombreuses valeurs mais aussi parce que les résultats du test statistique semblent contredire les observations visuelles à l'aide des boxplots. Il est possible que les manipulations nécessaires pour passer outre les erreurs de calcul de p-value en raison d'ex-aequo dans les rangs soient à l'origine des observations contradictoires pour le trafic 2020.

Il est recommandé de ne pas réaliser de conclusions strictes et de tenir compte plutôt de tendances visibles sur les boxplots réalisés.

VII.6. Comparaison du trafic 2019 et du trafic 2020

Suite à un travail réalisé en 2019 autour de l'INDA, il existe une série de mesures pour le trafic de 2019. Ce point du rapport a pour objectif de comparer si le trafic en 2019 est semblable à celui du trafic en 2020 en période de pandémie. Les données de trafic 2019 pour les 3 rues s'étend du 16/04/2019 13:00:00 UTC jusqu'au 03/05/2019 06:00:00 UTC et il s'agit de données horaires. Les données de trafic 2020 s'étend sur une période plus grande et il s'agit de données par minute. Il est donc nécessaire de découper le jeu de données de 2020 afin qu'il corresponde à la plage de mesure de 2019 ainsi que de réaliser une moyenne horaire pour 2020. La première étape de cette partie du traitement de données est de visualiser la période de mesure pour 2019 et celle pour 2020 afin de voir si celles-ci diffèrent de manière importante ou non. A l'aide la *Figure 42* et du *Tableau 18*, il est possible de visualiser celle-ci.

| Avril 2019 | | | | | | | Avril 2020 | | | | | | |
|------------|----|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|----|----|
| L | M | M | J | V | S | D | L | M | M | J | V | S | D |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 30 | 31 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 29 | 30 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 27 | 28 | 29 | 30 | 1 | 2 | 3 |

Figure 42 - Représentation sous forme d'agenda de la période commune pour les données trafic des années 2019 et 2020.

| | | Lundi | Mardi | Mercredi | Jeudi | Vendredi | Samedi | Dimanche |
|------------|-------------|-------|-------|----------|-------|----------|--------|----------|
| Année 2019 | Jour normal | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | Jour férié | 1 | | 1 | | | | |
| Année 2020 | Jour normal | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| | Jour férié | | | | | 1 | | |

Tableau 18 - Tableau détaillé des jours fériés, des jours normaux et des jours de week-end correspondant à la période commune pour les années 2019 et 2020.

La période caractérisant l'année 2020 comprend 2 jours de week-end supplémentaires et 1 journée de férié en moins. Lors de l'analyse du trafic de 2020 réalisée au point VII.5., la période 2 était constituée d'un jour férié (1^{er} juin 2020). L'intensité de trafic pour ce jour férié durant la période 2 du déconfinement de l'année 2020 se comportait de manière très similaire avec un dimanche. Dès lors, même si l'année 2019 contient 1 jour férié supplémentaire, on peut supposer que celui-ci se comporte d'une manière similaire à un dimanche et que les 2 périodes sont donc similaires (puisque la période sélectionnée présente un dimanche de plus pour 2020 et un férié de plus pour l'année 2019).

Le jeu de données pour le trafic 2020 est découpé pour correspondre à la période du trafic de 2019 et une moyenne est réalisée sur base horaire pour que le trafic 2020 présente le même pas de temps de mesure que le trafic de 2019. Il se présente donc sous la forme d'un jeu de données contenant le nombre de voitures passant par heure par chaque rue pour l'année 2019 et l'année 2020 et dont le nombre d'observations horaire vaut 402. Il faut néanmoins préciser que pour les jeux de données de 2020, les quelques NA's concernent des plages pour lesquelles le compteur radar n'avait plus d'autonomie. Ces périodes sont respectivement pour :

- La rue du Casino : du 22/04/2020 10h00 au 23/04/2020 11h00 ;
- La rue Joseph Netzer : du 23/04/2020 10h00 au 23/04/2020 12h00 ;
- L'avenue Victor Tesch : du 23/04/2020 10h00 au 23/04/2020 11h00.

Le *Tableau 19* indique les statistiques descriptives de la data utilisée pour la comparaison du trafic pour l'année 2019 et 2020.

| | Casino_2019 | Netzer_2019 | Tesch_2019 | Casino_2020 | Netzer_2020 | Tesch_2020 |
|---------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Min. | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1st Qu. | 3 | 53 | 45 | 1 | 8 | 9 |
| Median | 12 | 215 | 189 | 6 | 65 | 53 |
| Mean | 21 | 249 | 244 | 7 | 89 | 88 |
| 3rd Qu. | 28 | 433 | 468 | 10 | 164 | 166 |
| Max. | 151 | 826 | 695 | 27 | 383 | 375 |
| NA's | | | | 26 | 3 | 2 |

Tableau 19 - Statistiques descriptives des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période commune pour l'année 2019 et l'année 2020. Les données s'expriment en nombre de voitures par heure.

A l'aide de ces statistiques, il est clair que l'intensité du trafic en 2020, pour la période correspondant à la data du trafic de 2019, est beaucoup moindre que l'intensité de trafic pour l'année 2019. Les moyennes sont de l'ordre de 3 fois moins grandes pour 2020 que pour 2019. Pour l'année 2020, pour la période correspondante, la rue Joseph Netzer semble suivre les mêmes tendances que l'avenue Victor Tesch, cependant, pour la période correspondante en 2019, les paramètres de la rue Joseph Netzer sont légèrement plus élevés que les paramètres pour l'avenue Victor Tesch.

La *Figure 43* permet une représentation temporelle du trafic pour la période de 2019 et de 2020 (période = heure). De manière un peu simpliste, il semblerait que les pics dans les différentes rues pour l'année 2020 sont les mêmes que ceux pour 2019 sauf que ceux-ci présentent une amplitude moins importante.

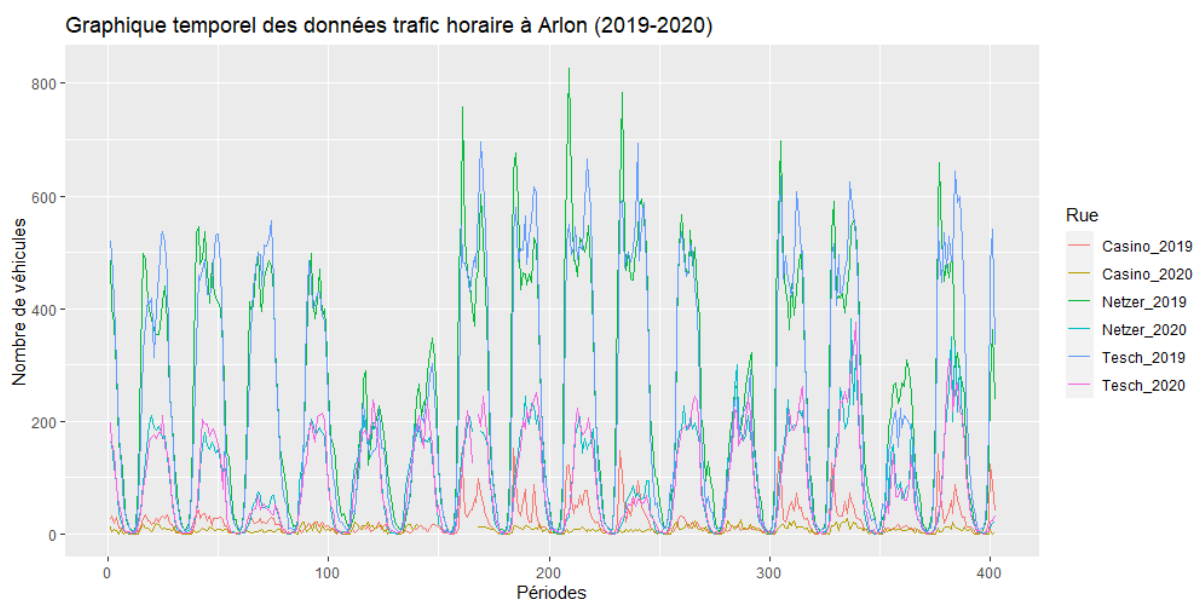


Figure 43 - Graphique temporel des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période commune pour l'année 2019 et l'année 2020.

Pour compléter la représentation visuelle des données trafic pour l'année 2019 et l'année 2020, un boxplot des données horaires a été réalisé et est repris sur la *Figure 44*. L'intervalle interquartile est beaucoup plus important pour l'année 2019 plutôt que celle de 2020. L'intensité du trafic correspondant au nombre de voitures passant par les différentes rues est beaucoup plus variable pour l'année 2019 que l'année 2020.

Sur cette représentation, il est aussi visible que la rue Joseph Netzer et l'avenue Victor Tesch semblent former un groupe de rues fréquentées et la rue du Casino est une rue peu fréquentée et ce, peu importe l'année où les mesures sont effectuées.

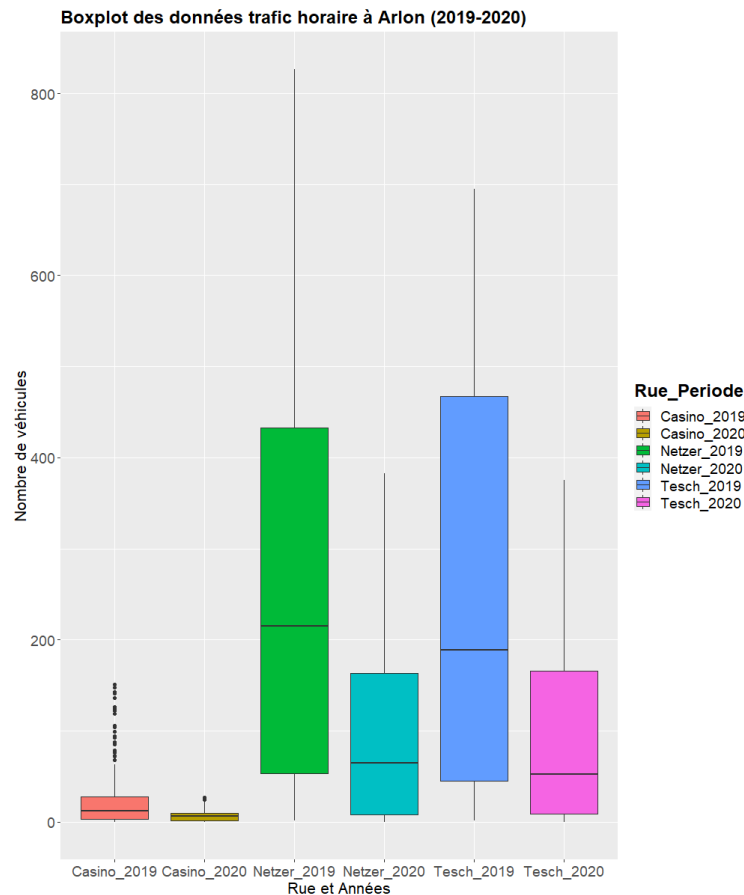


Figure 44 – Boxplot des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période commune pour l'année 2019 et l'année 2020.

Enfin, afin de déterminer la portée de la conclusion du test statistique non-paramétrique (est-ce que les conclusions de celui-ci vont porter sur les médianes ou sur les tendances) il y a lieu de réaliser la distribution des différentes variables (Figure 45). Si ces distributions sont similaires, la conclusion peut porter sur les médianes, par contre, si celles-ci sont différentes, il est plus judicieux de conclure sur des tendances plutôt que sur les médianes.

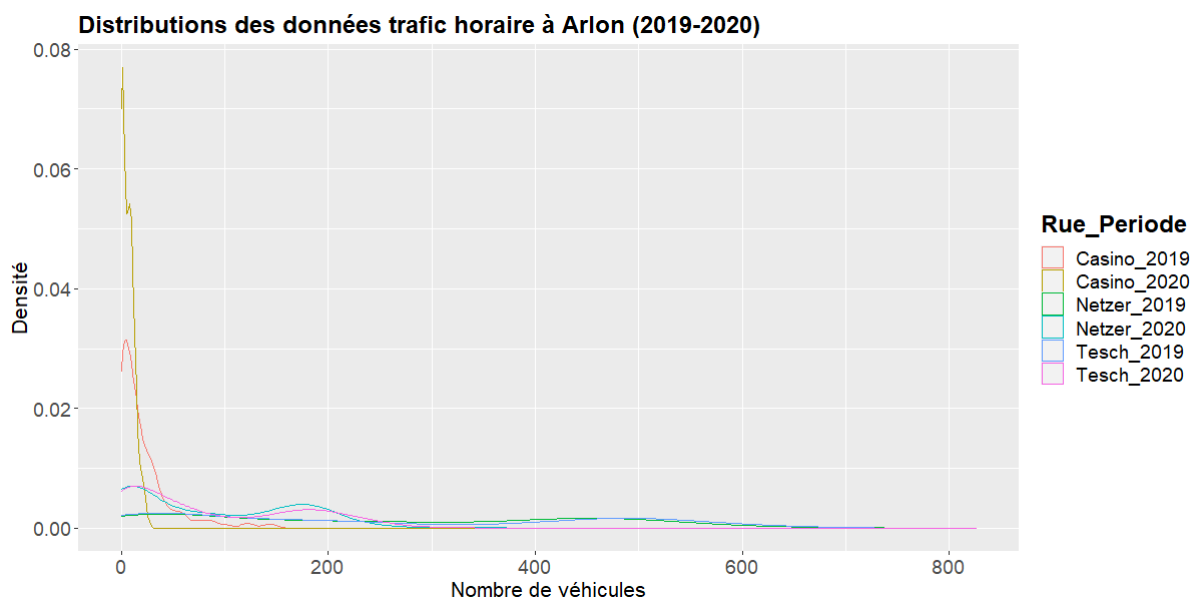


Figure 45 - Distribution des données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période commune pour l'année 2019 et l'année 2020.

Les distributions sont telles qu'il semble possible de tirer des conclusions sur les médianes pour une rue Joseph Netzer et l'avenue Victor Tesch pour une même année et qu'il est plus judicieux de tirer des conclusions sur les tendances dans le cadre de la comparaison des rues entre elles ou encore lorsque la comparaison porte sur la rue du Casino.

Pour réaliser ces conclusions, le *Tableau 20* reprend les valeurs des p-values pour le test non paramétrique réalisé.

| | Casino_2019 | Casino_2020 | Netzer_2019 | Netzer_2020 | Tesch_2019 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Casino_2020 | <2e-16 | - | - | - | - |
| Netzer_2019 | <2e-16 | <2e-16 | - | - | - |
| Netzer_2020 | <2e-16 | <2e-16 | <2e-16 | - | - |
| Tesch_2019 | <2e-16 | <2e-16 | 1 | <2e-16 | - |
| Tesch_2020 | <2e-16 | <2e-16 | <2e-16 | 1 | <2e-16 |

Tableau 20 - Tableau des p-values résultantes du test de statistique non-paramétrique de Wilcoxon pour les données trafic mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période commune pour l'année 2019 et l'année 2020.

Les résultats statistiques confirment l'analyse visuelle du boxplot (*Figure 44*). Pour toutes p-value inférieure à 0.05, les fluctuations d'échantillonnage ne suffisent pas pour expliquer la différence observée dans les tendances entre les variables. Cela signifie que les échantillons proviennent de populations distinctes ! Par contre, lorsque la p-value est supérieure à 0.05 (cas en surbrillance), il est possible de conclure que les différences entre les médianes (il s'agit des variables dont les courbes de distribution sont similaires) observées ne sont pas significatives et qu'elles soient uniquement dues à la fluctuation d'échantillonnage. Il n'est ainsi pas possible de réfuter que les médianes sont identiques dans la population visée pour la période concernée.

VII.7. Analyse des concentrations en PM_{2,5} des 3 rues en fonction de la période liée à la pandémie de covid-19

Ce point du rapport compare les jeux de données des concentrations des PM_{2,5} obtenus à l'aide des instruments contenant les 3 capteurs low-cost du SAM-ULiège. Ceux-ci sont séparés en différentes phases correspondant aux décisions des autorités gouvernementales en rapport avec la pandémie comme pour le point VII.5. Le jeu de données est constitué de concentrations en PM_{2,5} par minute résultat de la campagne de mesure réalisée autour de l'établissement scolaire. Les concentrations mesurées ne correspondent donc qu'à des concentrations en début de matinée jusqu'en fin d'après-midi et elles ne constituent pas des mesures en continues.

Dès lors, au vu de cet aspect discontinu, il ne sera pas présenté de graphique temporel comme ça a été réalisé dans le cadre de l'analyse du trafic pour l'année 2020 en fonction des périodes de confinement/déconfinement déterminées par les autorités gouvernementales.

Les *Tableaux 21 et 22* présentent les statistiques descriptives concernant les différentes rues en fonction de la période concernée.

| | Conf 1 | | | Conf 2 | | | Période 1A | | |
|---------|--------|---------------|--------------|--------|---------------|--------------|------------|---------------|--------------|
| | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch |
| Min. | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 1st Qu. | 5 | 5 | 5 | 7 | 6 | 6 | 4 | 6 | 3 |
| Median | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 7 | 5 | 9 | 6 |
| Mean | 11.5 | 10.7 | 10.3 | 8.2 | 8.4 | 7.7 | 5.9 | 9.6 | 7.0 |
| 3rd Qu. | 16 | 16 | 15 | 9 | 9 | 9 | 7 | 11 | 10 |
| Max. | 156 | 470 | 44 | 25 | 151 | 26 | 17 | 326 | 30 |

Tableau 21 - Statistiques descriptives des concentrations en PM_{2,5} mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude (de la période Conf1 à la période P1A) pour l'année 2020.

Les concentrations s'expriment en µg/m³.

| | Période 1B | | | Période 2 | | | Période 3 | | | Période 4 | | |
|---------|------------|---------------|--------------|-----------|---------------|--------------|-----------|---------------|--------------|-----------|---------------|--------------|
| | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch | Casino | Joseph Netzer | Victor Tesch |
| Min. | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1st Qu. | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 |
| Median | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 4 | 6 | 7 | 6 | 3 | 4 | 2 |
| Mean | 6.8 | 7.7 | 7.1 | 5.1 | 5.9 | 5.2 | 8.6 | 9.2 | 8.1 | 2.8 | 4.1 | 2.6 |
| 3rd Qu. | 10 | 9 | 9 | 6 | 6 | 7 | 14 | 14 | 13 | 4 | 4 | 3 |
| Max. | 24 | 180 | 24 | 89 | 800 | 26 | 174 | 114 | 41 | 24 | 53 | 47 |

Tableau 22 - Statistiques descriptives des concentrations en PM_{2,5} mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude (de la période P1B à la période P4) pour l'année 2020.

Les concentrations s'expriment en µg/m³.

Les statistiques descriptives présentes dans ces tableaux montrent que les concentrations moyennes sont très proches les unes des autres dans les 3 rues qui entourent l'établissement scolaire. Avant d'aller plus loin dans l'observation de ces statistiques descriptives, il faut noter à nouveau que les concentrations en PM_{2,5} doivent être exprimées à l'unité. La moyenne est indiquée avec une décimale à titre informative. Pour rappel, l'étude d'inter-comparaison indique une incertitude entre capteurs d'1 µg/m³.

Les différences sont très peu marquées hormis pour la période 1A où la concentration moyenne en PM_{2,5} pour la rue du Casino se situe aux alentours de 6 µg/m³ et à 10 µg/m³ pour la rue Joseph Netzer.

Les maxima de concentrations mesurées sont généralement observés à la rue Joseph Netzer qui présente la particularité d'accueillir un chantier de construction très actif durant la période de mesures. Ce chantier se faisant régulièrement livré à proximité de la position des instruments, il est possible que ça soit cette activité qui exprime certains pics de concentration élevés à la rue Joseph Netzer.

Néanmoins, si l'intérêt est porté sur l'espace interquartile, plus de la moitié des concentrations mesurées autour de l'établissement scolaire sont inférieures à 16 µg/m³ (cette concentration de 16 µg/m³ correspond à la valeur la plus haute du 3^{ème} quartile durant toute la période d'étude. Celle-ci correspond à la période de confinement avant l'ouverture des magasins de bricolage).

Afin de compléter l'information des statistiques descriptives, des boxplots ont été réalisés afin de proposer une représentation visuelle. Deux types de représentation ont été réalisées. La première (*Figure 46*) consiste à représenter côte à côte les 3 rues pour une même période et d'élargir cette

représentation pour les 7 périodes. La seconde représentation (*Figure 47*) scinde les rues et les périodes sont représentées pour chaque rue.

En-dessous de chaque représentation, un zoom est effectué sur la gamme de concentrations en $PM_{2,5}$ de 0 à 20 $\mu g/m^3$ afin de pouvoir observer avec plus de précisions les boîtes à moustache.

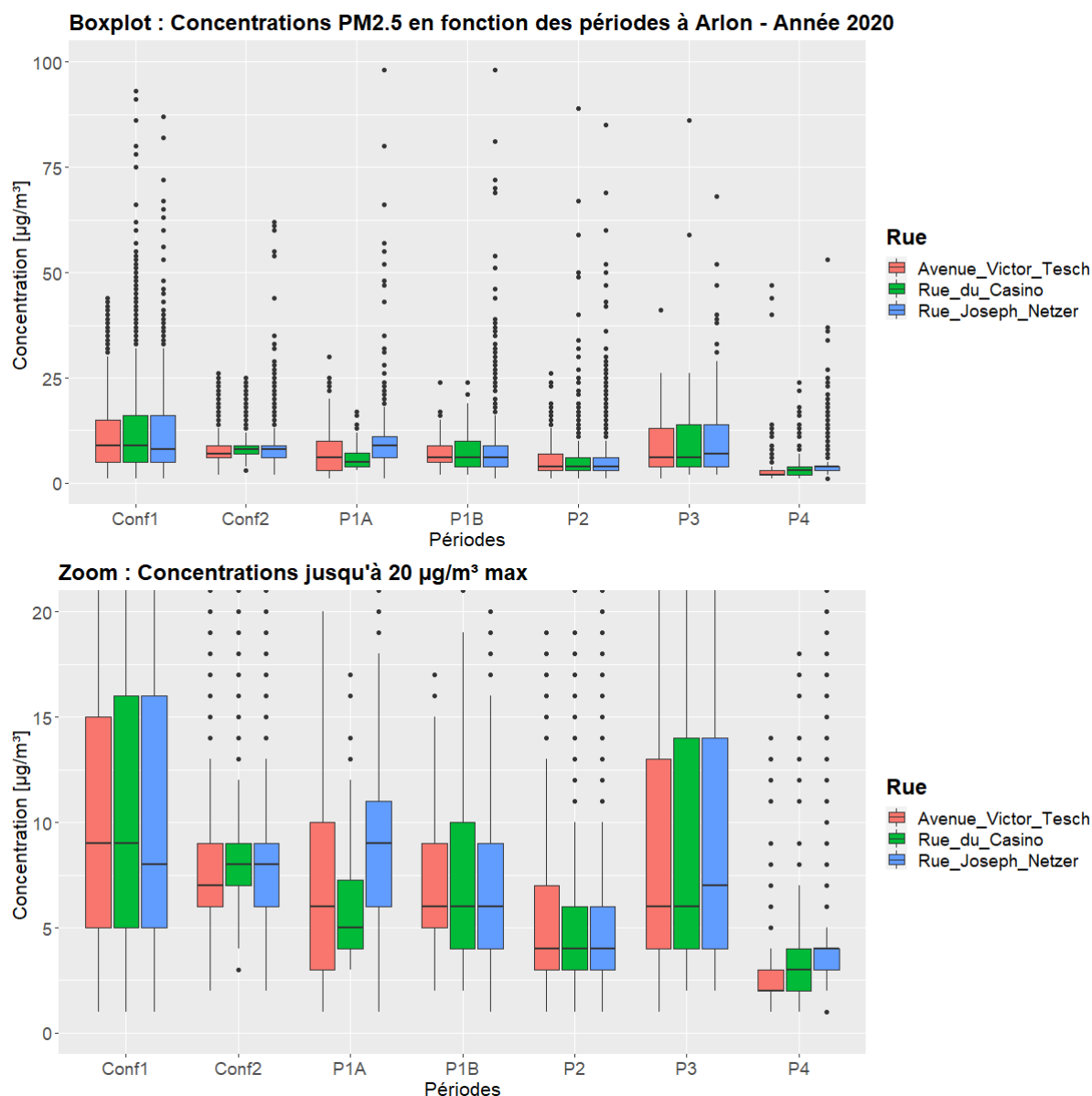


Figure 46 - (En haut) Boxplot des concentrations en $PM_{2,5}$ mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.

(En bas) Boxplot zoomé des concentrations mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.
Les concentrations s'expriment en $\mu g/m^3$.

La période « Conf1 » et « P3 » sont marquées par les espaces interquartiles les plus importants.

La période correspondant au confinement 1 correspond à la période présentant les concentrations les plus élevées en $PM_{2,5}$. Les 3 rues semblent former un groupe entre elles pour chaque période. Parfois, ces groupes sont légèrement décalés en raison d'une médiane différente, parfois le décalage est plus important comme c'est le cas pour la période P1A où les 3 rues bien que très proches géographiquement parlant semblent présenter des profils complètement différents.

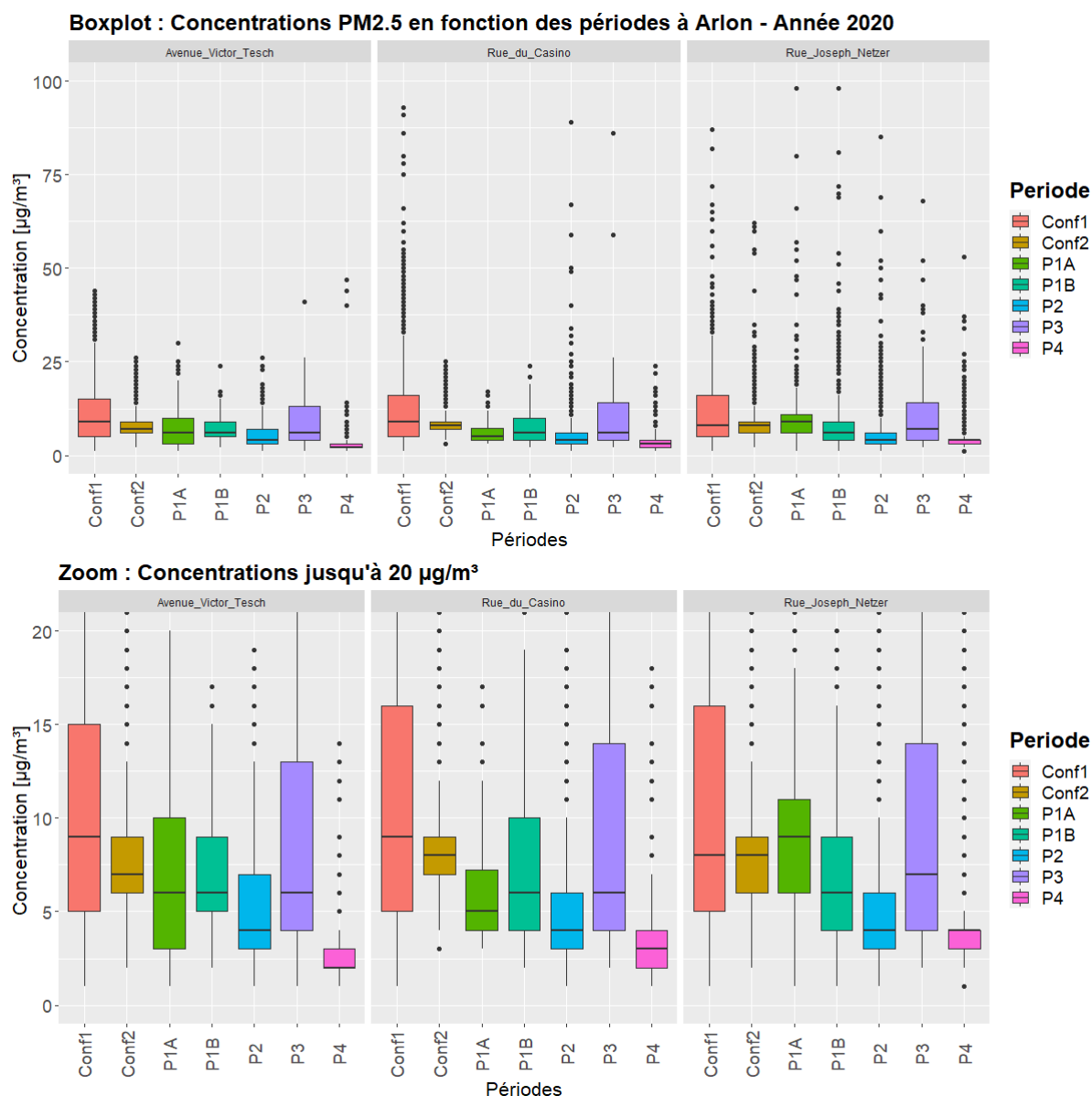


Figure 47 - (En haut) Boxplot des concentrations PM_{2.5} mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020. Boxplot en format wrap en fonction des rues.
(En bas) Boxplot zoomé des concentrations mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.
Les concentrations s'expriment en µg/m³.

Sur cette autre représentation (Figure XX), l'évolution temporelle est plus facilement observable. Il était attendu une diminution des concentrations en PM_{2.5} pour les périodes durant lesquelles l'activité humaine se voyait réduite en raison des restrictions formulées par les autorités gouvernementales dans le but d'endiguer la propagation du covid-19. Cependant le profil a l'air beaucoup plus aléatoire avec des valeurs de médianes qui diminuent généralement selon le sens chronologique sauf pour la période P3 où la valeur des médianes remonte (idem pour la période P1A dont le comportement différent a été mis en évidence grâce à la représentation boxplot précédente). Cette réduction de l'activité humaine a été étudiée notamment par la visualisation de l'intensité de trafic propre aux 3 rues dans les points précédents. La période 4 correspond à la réouverture des frontières et celle-ci est marquée par des concentrations en PM_{2.5} faibles alors qu'il s'agit d'une période présentant une activité humaine plus importante que durant les périodes de confinement. Cette période ne présente que quelques jours de mesures puisqu'elle a débuté le 15 juin et que les instruments ont été placés le 16, le 18, le 19 et le 25 juin. Il n'y a donc que 4 journées de mesure pour décrire cette période ce qui pourrait expliquer que l'espace interquartile est moins important que pour d'autres périodes.

Dans l'étape suivante de la méthodologie appliquée dans le cadre de ce travail, la densité des distributions est représentée afin de déterminer la portée que les conclusions du test statistique non-paramétrique peuvent prendre. En effet, si les variables qualitatives présentent une distribution similaire, le test peut conclure sur les médianes et sinon, il est préférable de conclure sur les tendances des échantillons. Puisqu'il s'agit d'une variable qualitative combinant à la fois la rue et la période analysée, deux type de distributions sont présentées. La première consiste à représenter la distribution des données en fonction des périodes pour les 3 rues (*Figure 48*) et la seconde consiste à représenter la distribution des 3 rues en scindant chaque période (*Figure 49*).

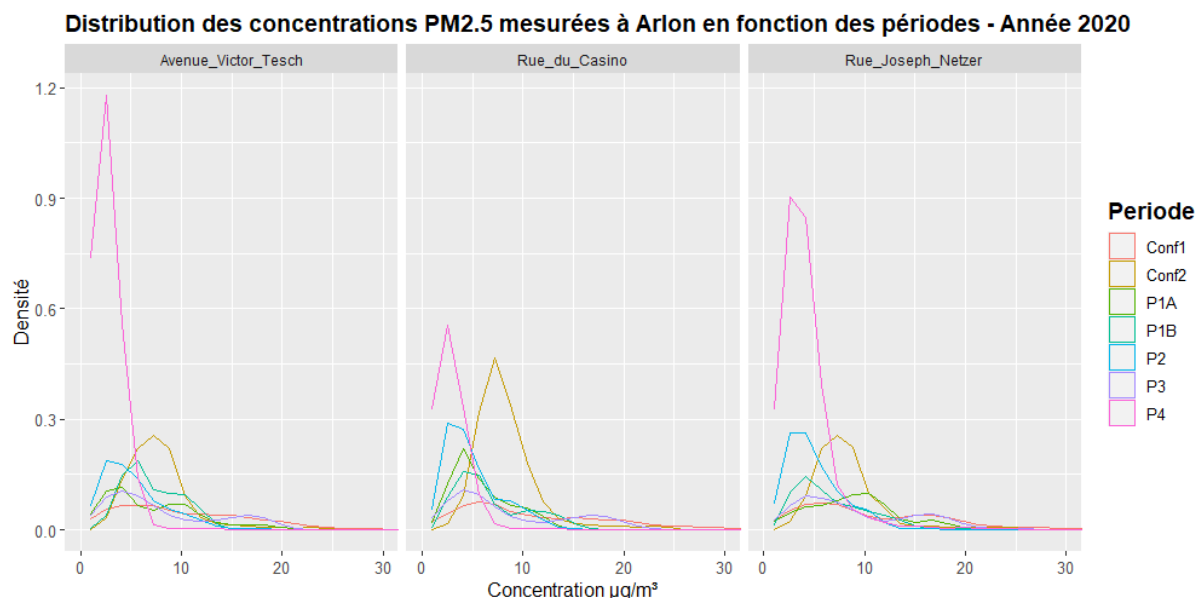


Figure 48 - Distribution des concentrations en PM_{2.5} mesurées dans les rues autour de l'INDA en fonction des phases liées au confinement pour l'année 2020.

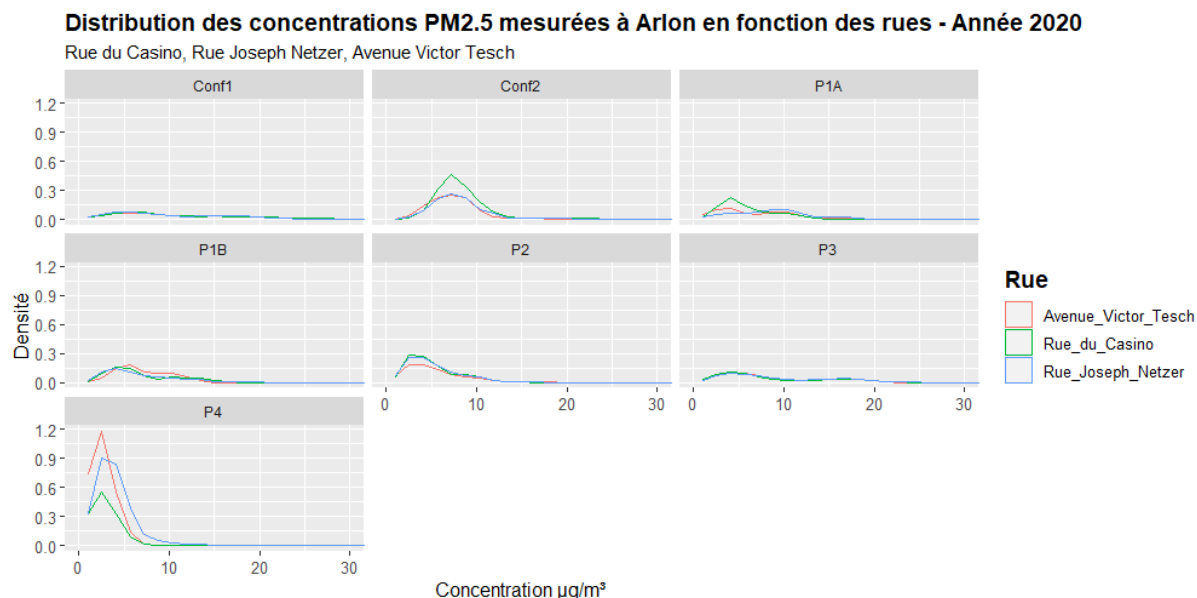


Figure 49 - Distribution des concentrations en PM_{2.5} mesurées selon les phases liées au confinement pour l'année 2020 correspondant aux rues autour de l'INDA.

Il en résulte que les distributions obtenues en scindant les périodes et en représentant sur une même échelle graphique les 3 rues sont similaires et il est possible de conclure le test statistique sur les médianes. Si les distributions sont représentées en fonction des périodes en scindant les rues, les distributions ne sont pas similaires et il sera plus judicieux de conclure le test statistique sur base de tendances.

La variable qualitative se présente ici comme pour l'analyse du trafic 2020 sous une forme combinée. En effet, il s'agit d'une combinaison de la période qui peut prendre 7 valeurs (de Conf1 à P4) et de la rue qui peut prendre 3 valeurs (rue Joseph Netzer, rue du Casino ou Avenue Victor Tesch). La variable qualitative peut donc prendre 21 valeurs différentes et donc le tableau reprenant les différentes p-values du test statistique est de taille imposante. Par soucis de clarté, celui-ci a été placé en Annexe 10 et seul le résultat synthétisé sera présenté ici. Trois tableaux reprenant les p-values supérieures à 0.05 ont été dressés. Le premier tableau (*Tableau 23*) reprend les p-values supérieures à 0.05 pour une même période mais des rues différentes. Le second (*Tableau 24*) reprend les p-values supérieures à 0.05 pour une même rue mais des périodes différentes. Enfin, le dernier tableau (*Tableau 25*) reprend les situations où une période caractérisant une rue montre une p-value supérieure à 0.05 par rapport à une autre période et une autre rue.

| Période | Rue 1 | Rue 2 |
|---------|-------------------|---------------------|
| Conf1 | Rue Joseph Netzer | Avenue Victor Tesch |
| P1A | Rue du Casino | Avenue Victor Tesch |
| P1B | Rue du Casino | Rue Joseph Netzer |
| P2 | Rue du Casino | Rue Joseph Netzer |
| P2 | Rue du Casino | Avenue Victor Tesch |
| P2 | Rue Joseph Netzer | Avenue Victor Tesch |
| P3 | Rue du Casino | Avenue Victor Tesch |

Tableau 23 - Tableau indiquant les paires de valeurs de la variable qualitative combinée pour lesquelles la p-value est supérieure à 0.05 lorsque la période est identique.

| Rue | Période 1 | Période 2 |
|---------------------|-----------|-----------|
| Rue Joseph Netzer | Conf2 | P3 |
| Avenue Victor Tesch | P1B | P3 |

Tableau 24 - Tableau indiquant les paires de valeurs de la variable qualitative combinée pour lesquelles la p-value est supérieure à 0.05 lorsque la rue est identique.

| Période 1 | Rue 1 | Période 2 | Rue 2 |
|-----------|---------------------|-----------|-------------------|
| Conf 2 | Avenue Victor Tesch | P3 | Rue Joseph Netzer |
| P1A | Avenue Victor Tesch | P1B | Rue Joseph Netzer |

Tableau 25 - Tableau indiquant les paires de valeurs de la variable qualitative combinée pour lesquelles la p-value est supérieure à 0.05 lorsque la rue et la période sont différentes.

Les situations où les p-values sont supérieures à 0.05 sont majoritairement des situations où les rues sont testées pour une même période. Généralement il n'y a donc pas de différences significatives des médianes entre les rues et les différences observées sont dues aux fluctuations d'échantillonnage. Les rues peuvent être considérées comme des échantillons provenant d'une même population dans ces situations.

Il existe d'autres situations où des p-values sont supérieures à 0.05 pour une même rue au cours de différentes périodes ou encore pour des situations caractérisant une rue au cours d'une période par rapport à une autre rue au cours d'une autre période. Ces situations semblent fortuites car les tendances visuelles montrent que les distributions semblent similaires dans le cas où les rues sont étudiées l'une par rapport aux autres au cours d'une même période mais celles-ci semblent différentes lorsque l'étude porte sur des périodes différentes. Le fait d'obtenir des échantillons qui peuvent être considérés comme similaires dans ces conditions particulièrement semble être lié au hasard plutôt qu'à un véritable phénomène.

VII.8. Etude de la corrélation des concentrations en PM_{2,5} avec le trafic au cours de l'année 2020

Pour ce dernier point, un jeu de données a été créé avec comme variables les différentes concentrations en PM_{2,5} pour chaque rue ainsi que le trafic correspondant. L'objectif poursuivi à ce point est de déterminer si une corrélation est observable entre les données trafic des différentes rues, entre les concentrations en PM_{2,5} mesurées pour chaque rue et entre ces 2 variables de type quantitatif. Un premier résultat a été généré en utilisant des données par minute correspondant au pas de temps le plus petit disponible. Cependant, celui-ci présentait une allure particulière et après discussions avec certains membres de l'équipe SAM-ULiège, il a été privilégié d'effectuer des moyennes sur 15 minutes pour les concentrations en PM_{2,5} et des sommes sur 15 minutes pour les données trafic, l'utilisation de données par minute étant découragée car le système représentant le site de terrain ne réagit de manière instantanée. En réalisant une moyenne sur 15 minutes, il sera peut-être possible d'obtenir un résultat utilisable.

La première étape pour préparer ce jeu de données est de regrouper les données trafic et les concentrations pour chaque rue et de conserver uniquement les moments auxquels les mesures ont été réalisées à la fois pour le trafic et les PM_{2,5} en même temps. Puisque les mesures des concentrations en PM_{2,5} provient des instruments du SAM-ULiège qui doivent être posés et enlevés de façon journalière, le jeu de donnée n'est constitué que de données en matinée et en après-midi.

Une fois cette sélection réalisée, le jeu de données est scindé afin de réaliser une somme par 15 minutes pour les données trafic et une moyenne par 15 minutes pour les concentrations. Lorsque les manipulations ont été effectuées sur chaque partie, le jeu de données est reconstitué et un graphique de corrélation est réalisé sur base des mêmes fondements explicités au point VII.2. Inter-comparaison.

Le *Tableau 26* reprend les statistiques descriptives du jeu de données utilisé.

| | Trafic Joseph Netzer | Trafic Casino | Trafic Victor Tesch | Concentration Casino | Concentration Netzer | Concentration Tesch |
|---------|----------------------|---------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Min. | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1.1 |
| 1st Qu. | 36 | 2 | 35 | 4.3 | 4.5 | 4.0 |
| Median | 47 | 3 | 46 | 6.9 | 7.1 | 6.7 |
| Mean | 58 | 5 | 55 | 8.2 | 8.0 | 7.7 |
| 3rd Qu. | 83 | 6 | 79 | 10.8 | 10.1 | 10.0 |
| Max. | 213 | 46 | 174 | 23.7 | 28.3 | 24.0 |

Tableau 26 - Statistiques descriptives du trafic et des concentrations en PM_{2,5} mesurées dans les rues autour de l'INDA durant la période d'étude pour l'année 2020.

Les trois premières colonnes du *Tableau 26* concernent la partie trafic et les trois dernières colonnes concernent la partie concentration en PM_{2,5}. La partie trafic présente de grandes différences entre la rue du Casino et la rue Joseph Netzer et l'Avenue Victor Tesch. Il a l'air de ressortir 2 groupes :

- La rue Joseph Netzer et l'avenue Victor Tesch sont des rues plus fréquentées que la rue du Casino. En effet, leur moyenne par 15 minutes est au-dessus de 50 véhicules. Leurs différents paramètres sont similaires sauf pour la valeur maximale qui est supérieure de 39 véhicules à la rue Joseph Netzer par rapport à l'avenue Victor Tesch ;
- La rue du Casino est quant à elle beaucoup moins fréquentée que les 2 autres puisque tous les paramètres qui la caractérisent correspondent à 1/10^{ème} des paramètres caractérisant les 2 autres rues (hormis pour la valeur maximale où ce rapport approximatif n'est pas observé).

Concernant les concentrations en PM_{2,5} ce jeu de données présente peu de différences entre les 3 rues. Tous les paramètres sont similaires entre eux et la concentration moyenne réalisée sur des périodes de 15 minutes sont situées aux alentours de 8 µg/m³. Cette valeur moyenne est intéressante puisque l'OMS recommande une concentration annuelle en PM_{2,5} de 10 µg/m³.

Après avoir décrit plus largement l'aspect du jeu de données utilisé en utilisant divers paramètres des statistiques descriptives de celui-ci, le second objectif de cette partie est d'identifier s'il existe des corrélations entre les différentes variables explicitées auparavant. Le graphique de corrélation est représenté sur la *Figure 50*. Sur celui-ci, le trafic pour les 3 rues apparaît corrélé positivement et il en est de même pour les concentrations en PM_{2,5}. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.90 pour les concentrations en PM_{2,5} et ils sont un peu moins élevés entre le trafic caractérisant les rues autour de l'établissement scolaire. La corrélation entre le trafic et les concentrations en PM_{2,5} correspondante pour chaque rue apparaît négative. C'est le même type de résultat qui avait été observé avec des données par minute qui ont conduit à la réalisation de calculs statistiques par période de 15

minutes. Il y a lieu de s'interroger sur la signification de ce résultat, celui-ci indiquerait que la concentration en $PM_{2,5}$ diminue lorsque le trafic augmente et inversement. Il est évident, avec les connaissances actuelles que des $PM_{2,5}$ sont produites par le trafic et qu'il aurait normalement fallu observer une corrélation positive entre ces variables.

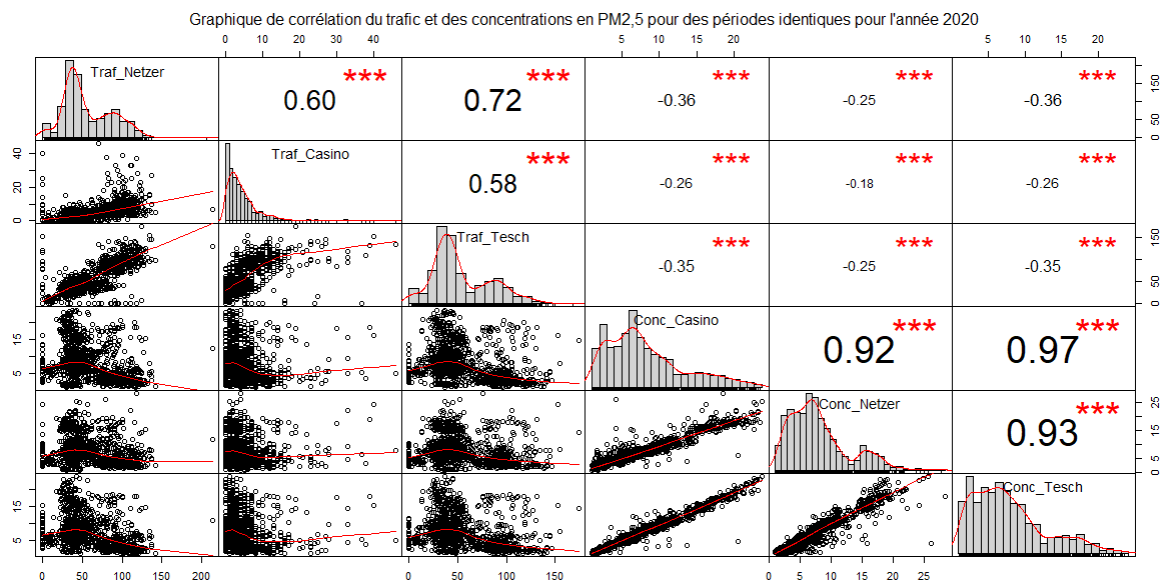


Figure 50 - Graphique de corrélation de Spearman obtenu en mettant en relation les jeux de données correspondant aux données trafic et aux concentrations en $PM_{2,5}$ des rues autour de l'INDA.

VIII. Conclusions

Dans le cadre de ce travail, il a été question de l'évolution des concentrations en $PM_{2,5}$ dans les rues entourant un établissement scolaire fondamental et primaire à proximité du centre d'une petite ville dans un contexte particulier. Le contexte en question correspond à une période de restrictions gouvernementales afin de limiter l'activité humaine tant sur le plan personnel que professionnel dans le but d'endiguer la propagation d'un virus dans le cadre d'une pandémie.

Pour étudier cette évolution, plusieurs étapes ont été réalisées afin de pouvoir identifier celle-ci le plus largement possible. Cette étude peut s'articuler sous la forme indiquée dans la partie introduction et objectif de ce travail et représenter 6 grandes étapes

- 1) Déterminer l'incertitude entre les capteurs utilisés pour monitorer le site d'étude ;
- 2) Déterminer si le confinement de l'année 2020 a influencé les concentrations mesurées par une station de référence la plus proche du site d'étude (en l'occurrence il s'agit ici d'une station en milieu rural) ;
- 3) Déterminer s'il est correct d'extrapoler l'information mesurée au niveau de la station de référence par rapport à notre site d'étude ;
- 4) Déterminer si l'activité humaine est effectivement impactée par les décisions prises par les autorités gouvernementales au niveau du site d'étude en centre urbain et si oui, dans quelles proportions ?
- 5) Identifier les caractéristiques du trafic pour l'année 2020 en fonction des 3 rues mais aussi en fonction des différentes phases caractérisant la période de confinement/déconfinement ;
- 6) Déterminer si les concentrations mesurées en $PM_{2,5}$ suivent les mêmes tendances que l'activité humaine et déterminer si celles-ci sont corrélées dans notre contexte géographique.

L'étude d'inter-comparaison a permis de calculer une incertitude entre capteurs de $1 \mu g/m^3$.

A l'aide d'une station de référence proche du site d'étude, en l'occurrence la station rurale d'Habay-la-Vieille, il est possible d'identifier l'impact du confinement sur le profil des concentrations de 2020 pour la période d'étude par rapport aux autres années durant la même période. L'échantillon correspondant à la période d'intérêt pour l'année 2019 est considéré, grâce au test statistique, comme provenant d'une population identique que l'échantillon correspondant à l'année 2020. Par conséquent, les périodes de restriction gouvernementales de l'année 2020 n'ont pas eu d'impact sur les concentrations en $PM_{2,5}$ par rapport à l'année 2019.

L'analyse des concentrations $PM_{2,5}$, issues de la station d'Habay et des mesures faites sur site autour d'une école en centre urbain indique que les concentrations en $PM_{2,5}$ restent généralement plus élevées pour le milieu urbain et qu'il n'est pas possible de considérer que l'échantillon provenant de la station de référence pour l'année 2020 provient de la même population que les échantillons collectés autour de l'établissement scolaire durant la même période. De plus, cette étape a permis d'indiquer que pour l'année 2020, le profil des concentrations en $PM_{2,5}$ est similaire dans les 3 rues et ce, malgré que celles-ci présentent des particularités morphologiques marquées.

La comparaison du trafic a été réalisée, pour les mêmes rues, pour l'année 2019 et l'année 2020 sur une période similaire. Il ressort de cette étude que l'année 2019 est marquée par une intensité de trafic beaucoup plus importante que l'année 2020. Il est possible de considérer que l'activité humaine s'est vue particulièrement réduite par la mise en place du confinement et des restrictions qui y sont associées.

L'analyse du trafic en fonction des périodes de confinement/déconfinement a mis en évidence que 2 rues sont particulièrement fréquentées autour de l'école. Il s'agit de la rue Joseph Netzer et de l'Avenue Victor Tesch. Leurs profils sont similaires, si bien qu'en fonction des phases du confinement/déconfinement, il est parfois possible de conclure que l'échantillon de l'une des rues provient de la même population théorique que l'autre rue. La rue du Casino quant à elle, est beaucoup moins fréquentée que les 2 autres. D'un point de vue temporel, au fur et à mesure de la levée des restrictions gouvernementales, le trafic a tendance à devenir de plus en plus intense, traduisant une augmentation de l'activité humaine au fur et à mesure de la levée des restrictions.

La caractérisation des profils des concentrations en $PM_{2,5}$ selon les rues en fonction des phases sur base des restrictions gouvernementales a mis en évidence des profils moyens de concentrations en $PM_{2,5}$ similaires indépendamment des rues. Cependant, certains pics ou maxima sont observés dans certaines rues et pas dans d'autres.

Pour la seconde partie de cette analyse, c'est l'évolution du profil des concentrations en $PM_{2,5}$ qui a été étudiée pour le site d'intérêt. L'hypothèse de base envisageait qu'en milieu urbain, l'activité humaine (dont le transport) est responsable en grande partie des concentrations en $PM_{2,5}$ observées. Malgré une évolution du trafic claire selon les périodes de levées de restrictions gouvernementales, aucune évolution claire des concentrations en $PM_{2,5}$ n'a pu être mise en évidence. Les profils varient légèrement d'une semaine à l'autre mais pas forcément dans le sens croissant puisque la période présentant les concentrations les plus importantes est la période où le confinement était strict et où il y a le plus de restrictions gouvernementales.

Pour expliquer une telle observation, plusieurs pistes sont possibles. Il est fait mention dans l'état de l'art de formation de particules secondaires à l'aide de précurseurs gazeux. Parmi ces précurseurs, certains proviennent notamment de l'agriculture. Il est possible que celle-ci a été particulièrement active durant la période de confinement et est responsable de ces concentrations élevées en $PM_{2,5}$ malgré une activité humaine fortement réduite. Il est possible aussi que le citoyen se soit chauffé davantage durant ces périodes de confinement et ce, malgré des températures importantes. En effet, le citoyen a passé plus de temps à son domicile, notamment en raison du télétravail et des restrictions gouvernementales, et la proportion de particules provenant du secteur résidentiel par chauffage est éventuellement devenue particulièrement importante. Enfin, les particules peuvent provenir d'origine naturelle et dans ce cas, elles peuvent provenir de distances importantes (particules désertiques, cendres volcaniques, etc) et que des circulations atmosphériques soient favorables durant les périodes concernées pour une contribution importante de ces particules d'origine naturelle.

Il serait intéressant de connaître plus largement les proportions des particules mesurées. S'il est possible, sur base d'un échantillon, de déterminer le pourcentage de particules provenant d'origine naturelle, d'émissions primaires et d'émissions secondaires, il serait ainsi possible d'isoler la proportion provenant du trafic et de pouvoir étudier plus largement la situation de l'établissement scolaire étudié.

Bibliographie

- Aouizerats, B. (2010). *Impacts radiatifs des aérosols sur la dynamique en couche limite urbaine : Application à la campagne CAPITOUL* (Toulouse). Retrieved from <http://thesesups.ups-tlse.fr/1591/>
- ATMO Bourgogne-Franche-Comté. (2015). Les rues canyons. Retrieved July 30, 2020, from https://www.atmo-bfc.org/medias/publications/les_rues_canyons.pdf
- ATMO Bourgogne-Franche-Comté. (2019). Les particules en suspension. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.atmo-bfc.org/publications/thematiques/thematiques>
- ATMO Bourgogne-Franche-Comté. (2020a). L'aethalomètre. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.atmo-bfc.org/publications/thematiques/l-analyseur-de-particules-de-type-aethalometre>
- ATMO Bourgogne-Franche-Comté. (2020b). Le BAM. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.atmo-bfc.org/publications/thematiques/l-analyseur-de-particules-de-type-bam>
- ATMO Bourgogne-Franche-Comté. (2020c). Le TEOM FDMS. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.atmo-bfc.org/publications/thematiques/l-analyseur-de-particules-de-type-teom-fdms>
- AWAC. (n.d.). Les microparticules (PM10 et PM2,5). Retrieved August 13, 2020, from Fiche microparticules website: <http://airquality.issep.be/WebAirQuality/MicroParticules.aspx>
- AWAC, & ISSeP. (2012). *Réseaux de surveillance de la Qualité de l'Air - Rapport 2012*. Retrieved from <http://airquality.issep.be/WebAirQuality/RapportAnnuel.aspx>
- AWAC, & ISSeP. (2017). *Réseaux de surveillance de la Qualité de l'Air - Rapport 2017*. Retrieved from <http://airquality.issep.be/WebAirQuality/RapportAnnuel.aspx>
- Belga. (2020, March 10). Coronavirus : La Wallonie interdit les visites dans les maisons de repos jusqu'au 31 mars. *RTBF*. Retrieved from https://www.rtf.be/info/regions/detail_coronavirus-la-wallonie-interdit-les-visites-dans-les-maisons-de-repos-jusqu-au-31-mars?id=10453150
- belgium.be. (2020a). Coronavirus : mesures renforcées. Retrieved July 11, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/coronavirus_mesures_renforcees
- belgium.be. (2020b). Coronavirus : phase 2 maintenue, passage en phase fédérale et mesures additionnelles. Retrieved June 30, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/coronavirus_phase_2_maintenue_passage_en_phase_federale_et_mesures_additionnelles
- belgium.be. (2020c). Fermeture des coiffeurs jusqu'au 5 avril. Retrieved July 11, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/fermeture_des_coiffeurs_jusquau_5_avril
- belgium.be. (2020d). Mesures prises par le Conseil de Sécurité du 24 juin 2020 - Coronavirus. Retrieved July 27, 2020, from https://www.belgium.be/fr/mesures_corona
- belgium.be. (2020e). Mesures prises par le Conseil de Sécurité du 3 juin 2020. Retrieved July 14, 2020, from <https://www.belgium.be/fr/corona>
- belgium.be. (2020f). Mesures prises par le Conseil national de Sécurité du 13 mai 2020. Retrieved July 14, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/mesures_prises_par_le_conseil_national_de_securite_du_13_mai_2020
- belgium.be. (2020g). Mesures prises par le Conseil national de Sécurité du 15 avril 2020. Retrieved July 11, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/mesures_prises_par_le_conseil_national_de_securite_du_15_avril_2020
- belgium.be. (2020h). Mesures prises par le Conseil national de Sécurité du 24 avril 2020. Retrieved from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/mesures_prises_par_le_conseil_national_de_securite_du_24_avril_2020

- belgium.be. (2020i). Mesures prises par le Conseil national de Sécurité du 27 mars 2020. Retrieved July 11, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/mesures_prises_par_le_conseil_national_de_securite_du_27_mars_2020
- belgium.be. (2020j). Mesures prises par le Conseil national de Sécurité du 6 mai 2020. Retrieved July 14, 2020, from https://www.belgium.be/fr/actualites/2020/mesures_prises_par_le_conseil_national_de_securite_du_6_mai_2020
- Binamé, A. (2020, April 20). Coronavirus en Belgique : augmentation du trafic en ce début de semaine. *RTBF*. Retrieved from https://www.rtbf.be/services/mobilinfo/detail_coronavirus-en-belgique-augmentation-du-traffic-en-ce-debut-de-semaine?id=10485676#:~:text=Durant les 3 premières semaines,mois de mars par exemple.
- Blin, C., Higué, I., Petit, P., & Brahy, V. (2007). Les particules en suspension dans l'air. Retrieved August 13, 2020, from Rapport Etat environnement Wallonie 2006-2007 website: <http://airquality.issep.be/WebAirQuality/MicroParticules.aspx>
- Bruxelles Environnement. (2012). *LA QUALITE DE L'AIR EN REGION DE BRUXELLES-CAPITALE Mesures à l'immission 2009-2011*. Retrieved from https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/QAir_Rpt0911_corr_ssAnnexesB_C_D_E_fr.PDF
- Bruxelles Environnement. (2020a). *Evaluation de l'impact des mesures prises dans le cadre de la pandémie de Covid-19 sur la qualité de l'air en Région de Bruxelles-Capitale - Rapport du 24 avril 2020*. Retrieved from https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/rapport_qualite_air_covid-19_24avril2020.pdf
- Bruxelles Environnement. (2020b). *Evaluation de l'impact des mesures prises dans le cadre de la pandémie de Covid-19 sur la qualité de l'air en Région de Bruxelles-Capitale - Rapport du 6 mai 2020*. Retrieved from https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/rapport_qualite_air_covid-19_06mai2020.pdf
- Bruxelles Environnement. (2020c). Le black carbon. Retrieved August 13, 2020, from <https://environnement.brussels/thematiques/air-climat/qualite-de-lair/cartographie-de-la-pollution/le-black-carbon>
- Burgraff, E. (2020, March 13). Coronavirus: en quoi consisterait la phase 3? *Le Soir*. Retrieved from <https://plus.lesoir.be/286915/article/2020-03-13/coronavirus-en-quoi-consisterait-la-phase-3>
- Burton, A. (2016). Les rues « canyons », des hotspots locaux de pollution de l'air. Retrieved July 30, 2020, from sante-environnement.be website: <https://www.sante-environnement.be/Les-rues-canyons-des-hotspots-locaux-de-pollution-de-l-air>
- CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement). (2017). *Validation du modèle de qualité de l'air ATMO-Street (Flandre) et RIO-IFDM (Bruxelles, Wallonie, Belgique) pour NO2 en 2017*. 1–4. Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/RIO-IFDM-OSPM-_NO2_Resume.pdf
- CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement). (2020a). Comment les particules primaires et secondaires se forment-elles? Retrieved August 13, 2020, from <https://www.irceline.be/fr/documentation/faq/que-sont-des-particules-primaires-et-secondaires>
- CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement). (2020b). Quelle est la composition chimique des particules? Retrieved August 13, 2020, from <https://www.irceline.be/fr/documentation/faq/quelle-est-la-composition-chimique-des-particules>
- CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement). (2020c). Quelles sont les lignes directrices de l'Organisation Mondiale de la Santé? Retrieved August 13, 2020, from <https://www.irceline.be/fr/documentation/faq/quelles-sont-les-lignes-directrices-de-lorganisation-mondiale-de-la-sante>
- CELINE (Cellule Interrégionale de l'Environnement). (2020d). Quels sont les impacts de concentrations élevées (PMs) sur la santé? Retrieved August 13, 2020, from <https://www.irceline.be/fr/documentation/faq/quels-sont-les-impacts-de-concentrations-elevees->

- Chevallier, L., & Aleixo, T. (2018). *Les micro-capteurs*. Retrieved from www.airpaca.org
- climat.be. (2020). Le climat en Belgique. Retrieved July 29, 2020, from <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/climat#:~:text=Le climat en Belgique est,polaire et le climat subtropical>.
- De Vries, A., & Meys, J. (2020). How to Use Quantile Plots to Check Data Normality in R. Retrieved August 13, 2020, from dummies website: <https://www.dummies.com/programming/r/how-to-use-quantile-plots-to-check-data-normality-in-r/>
- Département Informatique Université d'Angers. (2020). Corrélations de Pearson et de Spearman. Retrieved August 21, 2020, from http://www.info.univ-angers.fr/~gh/wstat/R15/demor5Biostats_org.html
- European Environment Agency. (2019a). *Air quality in Europe - 2019 report*. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>
- European Environment Agency. (2019b). Belgium – air pollution country fact sheet. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2019-country-fact-sheets/belgium-air-pollution-country>
- Fellows, I. (2011). Seeing if data is normally distributed in R. Retrieved August 13, 2020, from Stackoverflow website: <https://stackoverflow.com/questions/7781798/seeing-if-data-is-normally-distributed-in-r/7788452#7788452>
- Flament, J. (2020, March 13). Fermeture des écoles, discothèques, cafés et restaurants: la Belgique annonce des mesures inédites contre le coronavirus. *La Libre Belgique*. Retrieved from <https://www.lalibre.be/belgique/societe/la-belgique-va-annoncer-de-nouvelles-mesures-plus-strictes-face-au-coronavirus-5e6a7364f20d5a29c6574215>
- GRIMM. (2011). Environmental Dust Monitors. Retrieved August 13, 2020, from <https://mluk.brandenburg.de/i/download/Staubmessgerät EDM180.pdf>
- Icoms Detection S.A. (2020). TMS-SA. Retrieved August 10, 2020, from <https://icomsdetections.com/fr/project/tms-sa/>
- Institut Royal Météorologique belge. (2018). *Statistiques climatiques des communes belges Arlon (INS 81001)*. 1–6. Retrieved from https://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climate_INS53053_MONS_fr.pdf
- Institut Royal Météorologique belge. (2020). Le climat de la Belgique. Retrieved July 29, 2020, from <https://www.meteo.be/fr/climat/atlas-climatique/le-climat-de-la-belgique/contexte-du-climat-de-la-belgique>
- IPC Videohouse. (2020). *Persconferentie naar aanleiding van de Nationale Veiligheidsraad - 17 mars 2020*. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=sKmmV08R4_I&feature=youtu.be&t=6056
- Kern, J. (2020). SARS-CoV-2. Retrieved May 27, 2020, from FUTURA SANTÉ website: <https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/coronavirus-sars-cov-2-18559/>
- Kiprop, V. (2017). What is a Street Canyon ? Retrieved July 30, 2020, from Society - WorldAtlas website: <https://www.worldatlas.com/articles/what-is-a-street-canyon.html>
- Kuske, M. (2019). *ENV3025-1 : Environnement et santé Partim 3 : Impact sur la santé humaine*. Arlon: Université de Liège.
- Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. (2004). *Evaluation et contraintes d'application des modèles de rue*. Retrieved from https://www.lcsqa.org/system/files/rapport_rue_2004.pdf
- MAGSYS. (2020). Compteur radar TMSSA. Retrieved August 10, 2020, from <https://www.magsys.net/wp-content/uploads/download-manager-files/tmssa/Brochure TMSSA.pdf>
- Messoudi, H. (2020a, February 25). Voici la stratégie belge concernant le coronavirus. *RTBF*. Retrieved from https://www.rtbf.be/info/dossier/epidemie-de-coronavirus/detail_voici-la-strategie-

- belge-concernant-le-coronavirus?id=10441049
- Messoudi, H. (2020b, March 9). Coronavirus : la Belgique entre en "phase 2 renforcée." *RTBF*. Retrieved from https://www.rtb.be/info/dossier/epidemie-de-coronavirus/detail_coronavirus-la-belgique-entre-en-phase-2-renforcee?id=10451943
- Messoudi, H. (2020c, April 17). Visites dans les maisons de repos : elles restent interdites pour le moment. *RTBF*. Retrieved from https://www.rtb.be/info/belgique/detail_visites-dans-les-maisons-de-repos-elles-restent-interdites-pour-le-moment?id=10484587
- meteoblue. (2020). Climat Arlon. Retrieved July 29, 2020, from https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatmodelled/arlon_belgique_2803073
- Millot, G. (2018). *Comprendre et réaliser les tests statistiques à l'aide de R* (4th ed.). Louvain-la-Neuve: DeBoeck Supérieur.
- NVR CNS. (2020a). *Conférence de presse suite au Conseil national de sécurité du 15 avril 2020*. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=cxrnQxbO_h0&feature=youtu.be&t=250
- NVR CNS. (2020b). *Conférence de presse suite au Conseil national de sécurité du 24 avril 2020*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=KTabNWoh3qg&feature=youtu.be&t=3407>
- NVR CNS. (2020c). *Conférence de presse suite au Conseil national de sécurité du 27 mars 2020*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=zMBR4QvbkjQ&feature=youtu.be&t=744>
- Part'aera. (2020). Méthode gravimétrique et méthodes automatiques et en continu. Retrieved August 13, 2020, from <http://www.partaera.eu/fr/misurazioni-tipidimisura.php>
- Rami Alfarra, M. (2004). *Insights Into Atmospheric Organic Aerosols Using An Aerosol Mass Spectrometer* (Manchester). Retrieved from http://cires1.colorado.edu/jimenez/Papers/Alfarra_PhD_Thesis_1Chapter1_Introduction.pdf
- Riffault, V. (2019). *Week 1 : Introduction to air pollution issues Video 3 : Particulate air pollutants*. Lille: MOOC Air Quality.
- Romain, A. C. (2019). *ENV3021-1 - Outils de mesure des paramètres environnementaux : atmosphère - Partim 1 : Qualité de l'air ambiant*. Arlon, Belgique: Université de Liège.
- Service public de Wallonie, & Agence Wallonne de l'Air et du Climat. (2019). ÉMISSIONS DE PARTICULES. Retrieved August 20, 2020, from http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AIR4.html?fbclid=IwAR0jx3Y_XJAvhwLCfiYL8NUEQKz1bD_8sM-83gzY5HrPmy3W0W0hsuaqxHA
- Simon, F. (2019). *Les particules PM 2,5 : Influence du trafic de dépose scolaire sur la qualité de l'air d'une école Modélisation ENVI-MET et mesures à l'aide de capteurs "low cost"*. Université de Liège, Arlon.
- Srinivasan, A. (2013). Perform a Shapiro-Wilk Normality Test. Retrieved August 13, 2020, from Stackoverflow website: <https://stackoverflow.com/questions/15427692/perform-a-shapiro-wilk-normality-test/15427746#15427746>
- STHDA. (2020a). Matrice de corrélation: Guide simple pour analyser, formater et visualiser. Retrieved August 21, 2020, from <http://www.sthda.com/french/wiki/matrice-de-correlation-guide-simple-pour-analyser-formater-et-visualiser>
- STHDA. (2020b). Test de corrélation entre deux variables. Retrieved August 21, 2020, from <http://www.sthda.com/french/wiki/test-de-correlation-entre-deux-variables>
- timeanddate.com. (2020). Time Zones in Belgium. Retrieved August 10, 2020, from <https://www.timeanddate.com/time/zone/belgium>
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155–182. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)
- Wikipédia. (2020a). Arlon. Retrieved July 28, 2020, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Arlon>
- Wikipédia. (2020b). Coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère. Retrieved May 26, 2020, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Coronavirus_2_du_syndrome_respiratoire_aigu_sévère

- Wikipédia. (2020c). Maladie à coronavirus 2019. Retrieved May 27, 2020, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Maladie_à_coronavirus_2019
- Wikipédia. (2020d). Pandémie de Covid-19 en Belgique. Retrieved June 10, 2020, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Pandémie_de_Covid-19_en_Belgique
- Wikipédia. (2020e). Particules en suspension. Retrieved August 13, 2020, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Particules_en_suspension
- Wikipédia. (2020f). RStudio. Retrieved March 28, 2020, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/RStudio>
- Wikipédia. (2020g). Urban canyon. Retrieved July 30, 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Urban_canyon
- World Health Organization. (2006). *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre Synthèse de l'évaluation des risques*. Retrieved from https://www.who.int/publications/list/who_sde_phe_oeh_06_02/fr/
- XLStat. (2020). Quelle est la différence entre un test paramétrique et un test non-paramétrique. Retrieved August 13, 2020, from <https://help.xlstat.com/s/article/quelle-est-la-difference-entre-un-test-parametrique-et-un-test-non-parametrique?language=fr#:~:text=Par exemple%2C le test t,pas sur des distributions statistiques.>

IX. Annexes

ANNEXE 1 - FICHE CONSTRUCTEUR DES CAPTEURS LOW-COST PM

ANNEXE 2 - NOTICE D'UTILISATION DES INSTRUMENTS 3 X PM_{2,5}

ANNEXE 3 - MAIL INDIQUANT LA TAILLE DES PARTICULES COMPTEES PAR LES CAPTEURS HONEYWELL

ANNEXE 4 - MAIL INDIQUANT LA SITUATION DE MOBILITE AUTOUR DE L'ECOLE (TRANSPORTS EN COMMUN)
DURANT LA PERIODE DE CONFINEMENT

ANNEXE 5 – CALENDRIER DE POSITIONNEMENT DES INSTRUMENTS DU SAM-ULIEGE

ANNEXE 6 – EXEMPLE DE CORRECTION DES INSTRUMENTS SAM-ULIEGE

ANNEXE 7 – TABLEAU DE SUIVI ET PRISE DE NOTES SUR TERRAIN

ANNEXE 8 : TABLEAU SYNTHETIQUE DES PARAMETRES IMPLIQUES DANS LE PHENOMENE DE DISPERSION EN
MILIEU URBAIN – RUE CANYON

ANNEXE 9 - RESULTATS DU TEST STATISTIQUE DU TRAFIC 2020 EN FONCTION DE LA VARIABLE QUALITATIVE
PERIODE + RUE

ANNEXE 10 - RESULTATS DU TEST STATISTIQUE DES CONCENTRATIONS EN PM_{2,5} MESUREES EN FONCTION
DE LA VARIABLE QUALITATIVE PERIODE + RUE

Honeywell

HPM Series Particle Sensor

32322550
Issue B

Datasheet



DESCRIPTION

The Honeywell HPM Series Particle Sensor is a laser-based sensor which uses the light scattering method to detect and count particles in the concentration range of $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in a given environment. A laser light source illuminates a particle as it is pulled through the detection chamber. As particles pass through the laser beam, the light source becomes obscured and is recorded on the photo or light detector. The light is then analyzed and converted to an electrical signal providing particulate size and quantity to calculate concentrations in real time. The Honeywell particle sensor provides information on the particle concentration for given particle concentration range.

VALUE TO CUSTOMERS

- Enables the ability to more accurately and cost-effectively monitor or control environmental particulate contaminates
- Industry-leading long life of 20,000 hours of continuous use essentially equates to seven years of product life (based on eight hours of operation per day)
- Proven EMC performance enables the ability to perform more accurately in a variety of tough industrial environments
- Enhanced reliability allows for use in harsh environments

DIFFERENTIATION

- Industry-leading long life of 20,000 hours provides stable operation and continuous use
- Proven EMC performance, based on IEC61000 stable operation, $\pm 15\%$ accuracy

FEATURES

- Laser-based light scattering particle sensing
- Concentration range: $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Fully calibrated
- EMC: Heavy industrial level IEC61000
- Response time: $< 6 \text{ s}$
- Supply current: 80 mA max.
- Output signal: UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
- PM2.5 output (PM10 output optional with additional programming)
- RoHS compliant
- REACH compliant

POTENTIAL INDUSTRIAL APPLICATIONS

- HVAC:
 - Air conditioners
 - Air quality monitors
 - Environmental monitoring
- Consumer products:
 - Air cleaners
 - Air conditioners
 - Air purifiers
 - Car air cleaners
 - Handheld air quality detectors

Particle Sensor HPM Series

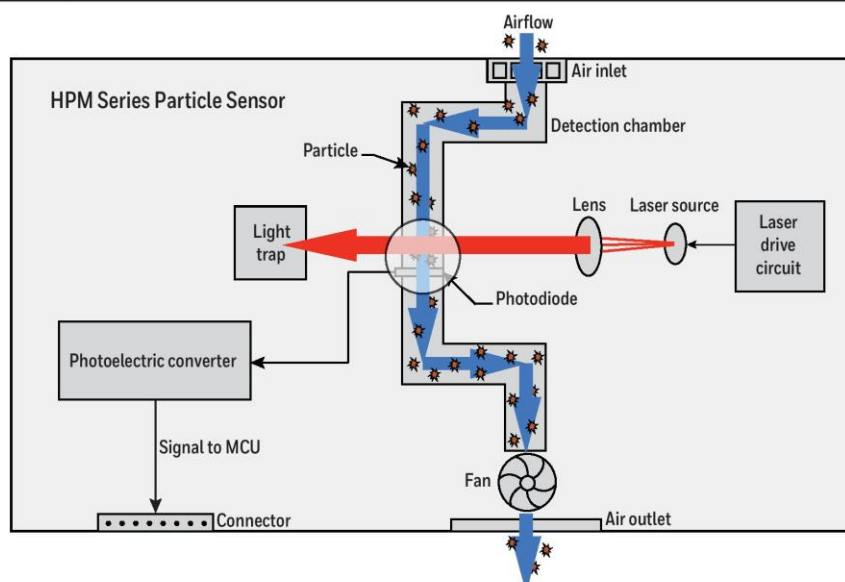
Table 1. Specifications

| Characteristic | Parameter |
|--|--|
| Operating principle | laser scattering |
| Detection ¹ | PM2.5 or PM10 |
| Output data ¹ | PM2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ with additional programming) |
| Concentration range | 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| Accuracy (at 25°C \pm 5°C): 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 15 \%$ |
| Response time | 6 s |
| Supply voltage | 5 V \pm 0.2V |
| Standby current (at 25°C \pm 5°C) | <20 mA |
| Supply current (at 25°C \pm 5°C) | <80 mA |
| Temperature: operating storage | -10°C to 50°C [-14°F to 122°F] -30°C to 65°C [-22°F to 149°F] |
| Humidity (operating and storage) | 0 %RH to 95 %RH non-condensing |
| Output protocol ² | UART; baud rate: 9600, databits: 8, stopbits: 1, parity: no |
| Operating time: continuous mode intermittent mode | 20,000 hr depends on duty cycle |
| ESD | ± 4 kV contact, ± 8 kV air per IEC 61000-4-2 |
| Radiated immunity | 1 V/m (80 MHz to 1000 MHz) per IEC 61000-4-3 |
| Fast transient burst | ± 0.5 kV per IEC61000-4-4 |
| Immunity to conducted disturbances radiated emissions | 3 V per IEC61000-4-6 |
| Radiated emissions | 40 dB 30 MHz to 230 MHz; 47 dB 230 MHz to 1000 MHz per CISPR 14 |
| Conducted emissions | 0.15 MHz to 30 MHz in compliance with CISPR 14 |

¹ PM2.5 is particulate matter $\leq 2.5 \mu\text{m}$ in diameter; PM10 is particulate matter $\leq 10 \mu\text{m}$ in diameter.

² Contact Honeywell for other output options.

Figure 1. HPM Series Operation



Particle Sensor

HPM Series

Figure 2. Mounting Dimensions (mm/[in] For reference only.)

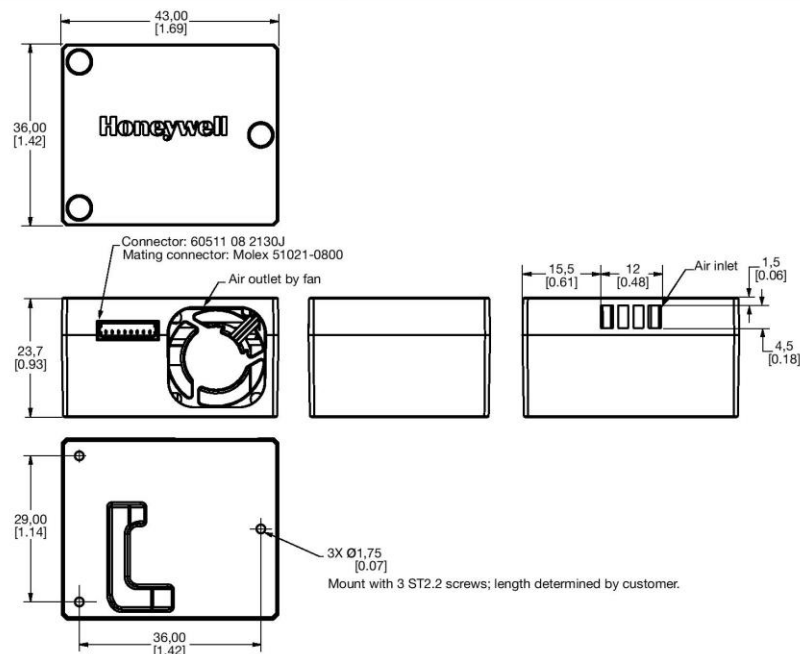
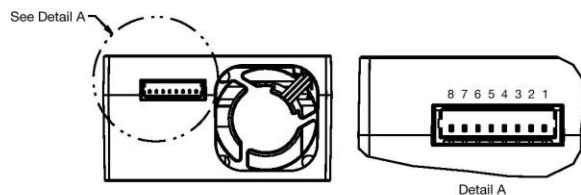


Table 2. Connector Pinout



| Pin | Name | Description |
|-----|--------|-------------------------------|
| 1 | +3.3 V | power output (+3.3 V/100 mA) |
| 2 | 5 V | power input (5 V) |
| 3 | N/A | N/A |
| 4 | N/A | N/A |
| 5 | TEST | used for testing (NA) |
| 6 | TX | UART TX output (0 - 3.3 V) |
| 7 | RX | UART RX input (0 - 3.3 V) |
| 8 | GND | power input (ground terminal) |

Table 3. Order Guide

| Catalog Listing | Description |
|-----------------|---|
| HPMA115S0-XXX | HPM Series PM2.5 Particle Sensor with UART output |

Particle Sensor HPM Series

Table 4. Customer Use Protocol

| Command Length (Bytes) | HEAD | LEN | CMD | Data | CS | Example |
|---|------|------|------|---|--|----------------------------|
| Read Particle Measuring Results | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x01 | 0x04 | NA | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 01 04 93 |
| Response, Pos ACK | 0x40 | 0x05 | 0x04 | *DF1, DF2, DF3, DF4 PM2.5 = DF1 * 256 + DF2 PM10 = DF3 * 256 + DF4* | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 40 05 04 00 30 00 31 56 |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |
| Start Particle Measurement | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x01 | 0x04 | NA | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 01 01 96 |
| Response, Pos ACK | | | | | 0xA5A5 | |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |
| Stop Particle Measurement | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x01 | 0x02 | NA | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 01 02 95 |
| Response, Pos ACK | | | | | 0xA5A5 | |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |
| Set Customer Adjustment Coefficient | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x02 | 0x08 | DF1: 30 ~ 200 (Default, 100) | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 02 08 64 2A |
| Response, Pos ACK | | | | | 0xA5A5 | |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |
| Read Customer Adjustment Coefficient | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x01 | 0x10 | NA | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 01 10 87 |
| Response, Pos ACK | 0x40 | 0x02 | 0x10 | DF1: 30 ~ 200 (Default, 100) | CS = MOD (((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 40 02 10 64 4A |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |
| Stop Auto Send | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x01 | 0x20 | NA | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 01 20 77 |
| Response, Pos ACK | | | | | 0xA5A5 | |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |
| Enable Auto Send | | | | | | |
| Send | 0x68 | 0x01 | 0x40 | NA | CS = MOD ((65536-(HEAD+LEN+CMD+DATA)), 256) | 68 01 40 57 |
| Response, Pos ACK | | | | | 0xA5A5 | |
| Response, Neg ACK | | | | | 0x9696 | |

¹Life may vary depending on the specific application in which the sensor is utilized.

ADDITIONAL INFORMATION

The following associated literature is available on the Honeywell web site at sensing.honeywell.com:

- Installation instructions

Find out more

Honeywell serves its customers through a worldwide network of sales offices and distributors. For application assistance, current specifications, pricing or name of the nearest Authorized Distributor, contact your local sales office.

To learn more about Honeywell's sensing and switching products, call **+1-815-235-6847** or **1-800-537-6945**, visit **sensing.honeywell.com**, or e-mail inquiries to **info.sc@honeywell.com**.

Honeywell Sensing and Internet of Things

9680 Old Bailes Road
Fort Mill, SC 29707
honeywell.com

⚠ WARNING PERSONAL INJURY

DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

⚠ WARNING MISUSE OF DOCUMENTATION

- The information presented in this datasheet is for reference only. Do not use this document as a product installation guide.
- Complete installation, operation, and maintenance information is provided in the instructions supplied with each product.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

Warranty/Remedy

Honeywell warrants goods of its manufacture as being free of defective materials and faulty workmanship during the applicable warranty period. Honeywell's standard product warranty applies unless agreed to otherwise by Honeywell in writing; please refer to your order acknowledgment or consult your local sales office for specific warranty details. If warranted goods are returned to Honeywell during the period of coverage, Honeywell will repair or replace, at its option, without charge those items that Honeywell, in its sole discretion, finds defective. **The foregoing is buyer's sole remedy and is in lieu of all other warranties, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. In no event shall Honeywell be liable for consequential, special, or indirect damages.**

While Honeywell may provide application assistance personally, through our literature and the Honeywell web site, it is buyer's sole responsibility to determine the suitability of the product in the application.

Specifications may change without notice. The information we supply is believed to be accurate and reliable as of this writing. However, Honeywell assumes no responsibility for its use.



32322552-B-EN | B | 1/17
© 2017 Honeywell International Inc. All rights reserved.

Mouser Electronics

Authorized Distributor

Click to View Pricing, Inventory, Delivery & Lifecycle Information:

[Honeywell:](#)

[HPMA115S0-XXX](#)

Notice d'utilisation instruments autonomes 3x PM_{2.5}

1. Description générale :

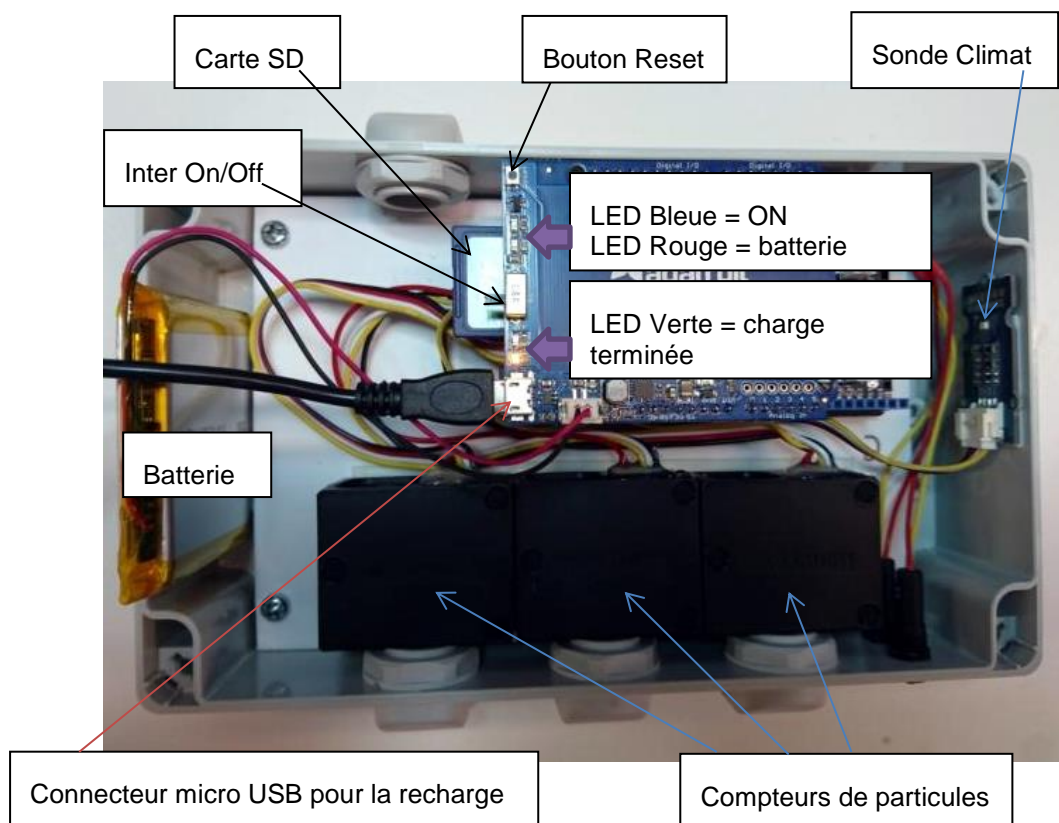
Cet instrument est composé des éléments suivants :

- 3 compteurs de particules Honeywell HPM115S0
- 1 capteur température / humidité relative / pression atmosphérique Bosch BME280
- 1 carte mère Arduino Mega 2560
- 1 horloge temps réel + support carte SD GT1046 (avec pile CR1220)
- 1 accu LiPo 5100mAh + régulateur de charge PowerBoost d'Adafruit

Pour l'utilisation, il est fourni avec les accessoires suivants :

- 1 bloc secteur USB 5V 1.2A RS
- 1 cordon USB A vers micro USB B
- 1 carte SD 4Go

2. Emplacements des composants



3. Programmation de l'horloge interne

L'instrument ne possédant ni clavier ni display, le réglage de la date et de l'heure doit se faire via un terminal externe. Procédure :

1. Connecter un câble USB entre le connecteur type B de la carte mère et votre PC
2. Lancer une application terminal (vitesse 9600,8N1) et envoyez le caractère « C »
3. Le système va alors demander les informations suivantes :
« Day ? » « Month ? » « Year ? » « Hour ? » « Minute ? » « Second ? »
il suffit d'entrer les valeurs correspondantes (en heure UTC de préférence) et terminer par « Enter »
4. Redémarrez le système en pressant le bouton « Reset »

4. Paramétrage sur la carte SD

La carte SD possède un fichier de paramétrage des intervalles de mesure « Timings.dat », avec :

- Ligne 1 : intervalle entre 2 mesures (et écritures sur carte SD), valeur en secondes
Valeur par défaut : 60 secondes
- Ligne 2 : durée de fonctionnement de l'aspiration des compteurs de particules, valeur en secondes
Valeur par défaut : 30 secondes

La ligne 2 permet de ne mettre en service les compteurs de particules que peu de temps avant la mesure, ce qui permet de gagner en autonomie batterie.

Remarque : si le fichier « Timings.dat » n'est pas présent, les valeurs par défaut sont utilisées.

5. LEDs extérieures

2 LEDs sont placées à l'extérieur du boîtier afin de déterminer son fonctionnement.

Informations :

- A la mise en service : la LED rouge s'illumine lors de l'initialisation de la carte SD, elle doit s'éteindre une fois la configuration terminée. Si la LED rouge reste allumée, c'est que la carte SD n'est pas présente ou endommagée.
- En fonctionnement :
 - La LED verte clignote 1x par seconde en fonctionnement normal, si elle reste allumée en permanence, c'est que le système d'acquisition c'est arrêté suite à un défaut interne
 - La LED rouge s'illumine en cas de batterie faible (niveau <25%)

6. Manipulation de la carte SD

L'insertion et le retrait de la carte SD doit toujours se faire instrument éteint (commutateur placé sur OFF).

Les fichiers présents sur la carte SD sont des fichiers texte triés par date directement exploitable sous Excel.

7. Gestion de l'énergie

- La batterie permet une autonomie de 8 à 10 heures
- Le temps de recharge complet est d'environ 8 heures
- Il est possible d'utiliser l'instrument en continu en laissant le bloc secteur connecté en permanence

8. Utilisation à l'extérieur

- Le coffret peut être exposé à la pluie sous certaines conditions :
 - Il doit être placé horizontalement, les ouies d'aspiration vers le bas
 - Le couvercle ainsi que le joint d'étanchéité doivent être correctement placés

9. Maintenance

- Pour obtenir une visualisation en temps réel des mesures et de l'état du système, il est possible de connecter un afficheur LCD sur le connecteur IIC libre. Cet élément n'est pas laissé en permanence pour une raison de consommation importante.

Annexe 3 - Mail indiquant la taille des particules comptées par les capteurs Honeywell

De: "Reynolds, Andy" <Andrew.Reynolds2@Honeywell.com>
À: "laurent collard" <laurent.collard@ulg.ac.be>
Cc: "Wessels, Wade" <Wade.Wessels@Honeywell.com>, "CRC-TECHUK (UK07)" <CRC-TECHUK@Honeywell.com>, "Bernabei, Luca" <Luca.Bernabei@Honeywell.com>
Envoyé: Jeudi 13 Juillet 2017 00:41:48
Objet: RE: Support for HPM Series Particle Sensor

Honeywell Internal

Hello Laurent,

The PM 10 values are calculated from our PM 2.5 readings based on the particle distribution of cigarette smoke which is what we use to calibrate the current sensor. If you are using a different standard particulate additional programming will be needed. HPM sensor currently counts particles from 0.3 um to 5 um.

Best regards,
Andy Reynolds

Global Application Engineer
BarCode Scanning and Particle Sensors
Honeywell Sensing & Productivity Solutions
16201 25th Ave W
Lynnwood, WA 98087
Office: +1 425 921-4322
Mobile: 206 321-3266

From: sensingcontroleurope, crc [mailto:crc.sensingcontroleurope@Honeywell.com]
Sent: 03 July 2017 11:23
To: CRC-TECHUK (UK07) <CRC-TECHUK@Honeywell.com<mailto:CRC-TECHUK@Honeywell.com>>
Subject: FW: Support for HPM Series Particle Sensor

Annexe 4 - Mail indiquant la situation de mobilité autour de l'école (transports en commun) durant la période de confinement

**RE: Position des radars dans le cadre de la réalisation d'un mémoire**2 Avril 2020 10:21

Expéditeur : Vincent Thibaut

À : jeremy muller

Bonjour,


Le TEC m'informe de 2 éléments:

1. ils sont passés en horaire "vacances", donc il y a une diminution de l'offre en bus passant par l'arrêt "INDA" par rapport aux jours "normaux"
2. en raison de travaux à la rue des déportés conduisant à une déviation des bus TEC sur la rue Netzer, toutes les lignes qui effectuaient le mouvement Avenue Victor Tesch --> rue des déportés en venant de la gare ont été déviés sur l'itinéraire "Gare - Av. J-B Nothomb - rue Joseph Netzer - carrefour Liedel - rue Sonnetty". Par conséquent, il y a donc une augmentation de trafic à la rue Netzer par rapport à la normale.

L'un dans l'autre, il m'est impossible de dire si nous avons une augmentation nette ou une diminution nette du nombre de bus par rapport à la période hors coronavirus.

Par contre, la déviation due aux travaux de la rue des déportés sera toujours effective environ 15 jours après la reprise (délai nécessaire pour terminer les travaux). A vous de voir donc si vous voulez effectuer vos comptages dans ou hors de ces 15 premiers jours, ce qui aura donc un impact sur la fréquentation en bus de la rue Joseph Netzer.

Bien à vous,

**Thibaut VINCENT**
Conseiller en Mobilité
Ville d'Arlon
Tél : 063/21.30.71
Rue Paul Reuter, 8
6700 Arlon

Annexe 5 – Calendrier de positionnement des instruments du SAM-ULiège

| Mars | Avril | Mai | Juin |
|------|-------|-----|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 4 | 4 | 4 |
| 5 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 6 | 6 | 6 |
| 7 | 7 | 7 | 7 |
| 8 | 8 | 8 | 8 |
| 9 | 9 | 9 | 9 |
| 10 | 10 | 10 | 10 |
| 11 | 11 | 11 | 11 |
| 12 | 12 | 12 | 12 |
| 13 | 13 | 13 | 13 |
| 14 | 14 | 14 | 14 |
| 15 | 15 | 15 | 15 |
| 16 | 16 | 16 | 16 |
| 17 | 17 | 17 | 17 |
| 18 | 18 | 18 | 18 |
| 19 | 19 | 19 | 19 |
| 20 | 20 | 20 | 20 |
| 21 | 21 | 21 | 21 |
| 22 | 22 | 22 | 22 |
| 23 | 23 | 23 | 23 |
| 24 | 24 | 24 | 24 |
| 25 | 25 | 25 | 25 |
| 26 | 26 | 26 | 26 |
| 27 | 27 | 27 | 27 |
| 28 | 28 | 28 | 28 |
| 29 | 29 | 29 | 29 |
| 30 | 30 | 30 | 30 |
| 31 | | 31 | |

| | |
|--|---|
| | 3 boitiers installés et ayant fonctionné correctement |
| | L'un des 3 boitiers n'a pas fonctionné correctement. Seulement 2 ont fonctionné correctement. |
| | Intercomparaison des capteurs |

Annexe 6 – Exemple de correction des instruments SAM-ULiège

| | Instrument 1 | | | Instrument 2 | | | Instrument 3 | | |
|--------------|--------------|---------------|---------|--------------|---------------|---------|--------------|---------------|---------|
| Date | heure notée | heure capteur | delta h | heure notée | heure capteur | delta h | heure notée | heure capteur | delta h |
| 29/03/2020 | 7:39 | 6:17 | 1:22 | 7:44 | 6:05 | 1:39 | 7:48 | 6:12 | 1:36 |
| 30/03/2020 | 8:01 | 6:38 | 1:23 | 7:54 | 6:15 | 1:39 | 8:05 | 6:29 | 1:36 |
| 31/03/2020 | 10:42 | 9:19 | 1:23 | 10:34 | 8:56 | 1:38 | 10:37 | 9:02 | 1:35 |
| 01/04/2020 | 7:53 | 6:32 | 1:21 | 7:48 | 6:11 | 1:37 | 7:57 | 6:22 | 1:35 |
| 02/04/2020 | 7:59 | 6:37 | 1:22 | 8:03 | 6:24 | 1:39 | 8:07 | 6:31 | 1:36 |
| 03/04/2020 | 8:02 | 6:39 | 1:23 | 8:06 | 6:28 | 1:38 | 7:58 | 6:22 | 1:36 |
| 04/04/2020 | 7:55 | 6:33 | 1:22 | 7:47 | 6:09 | 1:38 | 7:51 | 6:16 | 1:35 |
| 10/04/2020 | 7:41 | 6:20 | 1:21 | 7:45 | 6:07 | 1:38 | 7:49 | 6:14 | 1:35 |
| 11/04/2020 | 8:08 | 6:46 | 1:22 | 7:59 | 6:21 | 1:38 | 8:03 | 6:28 | 1:35 |
| 16/04/2020 | 7:14 | 5:53 | 1:21 | 7:18 | 5:40 | 1:38 | 7:11 | 5:36 | 1:35 |
| 17/04/2020 | 7:28 | 6:06 | 1:22 | 7:35 | 5:57 | 1:38 | 7:31 | 5:56 | 1:35 |
| 20/04/2020 | 7:32 | 6:10 | 1:22 | 7:36 | 5:58 | 1:38 | 7:28 | 5:53 | 1:35 |
| 21/04/2020 | 7:45 | 6:24 | 1:21 | 7:37 | 5:59 | 1:38 | 7:41 | 6:05 | 1:36 |
| 22/04/2020 | 7:36 | 6:14 | 1:22 | 7:42 | 6:05 | 1:37 | 7:39 | 6:04 | 1:35 |
| 23/04/2020 | 7:41 | 6:20 | 1:21 | 7:37 | 6:00 | 1:37 | 7:34 | 5:59 | 1:35 |
| 24/04/2020 | 7:39 | 6:15 | 1:24 | 7:36 | 6:01 | 1:35 | 7:42 | 6:08 | 1:34 |
| 25/04/2020 | 7:47 | 6:26 | 1:21 | 7:50 | 6:13 | 1:37 | 7:54 | 6:20 | 1:34 |
| 04/05/2020 | | | | 7:39 | 6:01 | 1:38 | 7:29 | 5:55 | 1:34 |
| 05/05/2020 | | | | 7:32 | 5:55 | 1:37 | 7:35 | 6:01 | 1:34 |
| 06/05/2020 | | | | 7:31 | 5:54 | 1:37 | 7:37 | 6:03 | 1:34 |
| Correction : | | | 1:21 | Correction : | | 1:37 | Correction : | | 1:35 |

Annexe 7 – Tableau de suivi et prise de notes sur terrain

| Date | Arrival | Departure | Sensor Number | Street | Setup time | Date and time | Setup observation | Arrival | Departure | Removal time | Date and time | Removal observation | Battery status | Cloudiness | Loading battery | Covid Prot |
|------------|---------|-----------|---------------|---------------------|------------|------------------|--|---------|-----------|--------------|------------------|--|----------------|--|-----------------|------------|
| 17/03/2020 | 07:35 | 08:00 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:35 | 17/03/2020 07:35 | Red light pas de fichier txt | 16:38 | 16:56 | 16:41 | 17/03/2020 16:41 | | No Battery | | 17:24 | Phase 0 |
| 17/03/2020 | 07:35 | 08:00 | 2 | Rue Du Casino | 07:35 | 17/03/2020 07:35 | | 16:38 | 16:56 | 16:45 | 17/03/2020 16:45 | | Green Light | 8:50 more than 50% clouds | 17:24 | Phase 0 |
| 17/03/2020 | 07:35 | 08:00 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:35 | 17/03/2020 07:35 | | 16:38 | 16:56 | 16:53 | 17/03/2020 16:53 | | No Battery | 10:34 -> 0% until removal | 17:24 | Phase 0 |
| 18/03/2020 | 07:33 | 07:52 | 1 | Avenue Victor Tesch | 07:47 | 18/03/2020 07:47 | Red light pas de fichier txt | 16:31 | 16:46 | 16:44 | 18/03/2020 16:44 | | No Battery | | 17:08 | Conf |
| 18/03/2020 | 07:33 | 07:52 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:35 | 18/03/2020 07:35 | Active construction site | 16:31 | 16:46 | 16:33 | 18/03/2020 16:33 | | Green Light | 7:49 -> 70% | 17:08 | Conf |
| 18/03/2020 | 07:33 | 07:52 | 3 | Rue Du Casino | 07:42 | 18/03/2020 07:42 | | 16:31 | 16:46 | 16:38 | 18/03/2020 16:38 | | Red Light | 9:42 -> 10% until removal (from Messancy) | 17:08 | Conf |
| 19/03/2020 | | | 1 | | | | Battery test after problems the previous days | | | | | | | | | Conf |
| 19/03/2020 | 07:32 | 07:52 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:35 | 19/03/2020 07:35 | Active construction site | 16:30 | 16:42 | 16:40 | 19/03/2020 16:40 | Smoking person around | Green Light | 7:50 -> 30% | 17:04 | Conf |
| 19/03/2020 | 07:32 | 07:52 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:48 | 19/03/2020 07:48 | | 16:30 | 16:42 | 16:32 | 19/03/2020 16:32 | | Red Light | 14:33 -> 90% until removal (from Messancy) | 17:04 | Conf |
| 20/03/2020 | 07:39 | 07:54 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:43 | 20/03/2020 07:43 | Starting with red light and after 5 secondes, only green light. Active construction site | 16:50 | 17:07 | 16:55 | 20/03/2020 16:55 | | Red Light | 7:39 -> 30% | 17:36 | Conf |
| 20/03/2020 | 07:39 | 07:54 | 2 | Avenue Victor Tesch | 07:51 | 20/03/2020 07:51 | | 16:50 | 17:07 | 17:04 | 20/03/2020 17:04 | | Green Light | 9:50 -> 10% | 17:36 | Conf |
| 20/03/2020 | 07:39 | 07:54 | 3 | Rue Du Casino | 07:47 | 20/03/2020 07:47 | | 16:50 | 17:07 | 16:58 | 20/03/2020 16:58 | | Red Light | 15:50 -> 80% | 17:36 | Conf |
| 22/03/2020 | 07:33 | 07:55 | 1 | Rue Du Casino | 07:43 | 22/03/2020 07:43 | Very cold wind this day | 17:45 | 18:01 | 17:54 | 22/03/2020 17:54 | | Red Light | | 18:21 | Conf |
| 22/03/2020 | 07:33 | 07:55 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:37 | 22/03/2020 07:37 | Inactive construction site | 17:45 | 18:01 | 17:49 | 22/03/2020 17:49 | | Red Light | 7:33 -> 0% (until removal) | 18:21 | Conf |
| 22/03/2020 | 07:33 | 07:55 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:49 | 22/03/2020 07:49 | | 17:45 | 18:01 | 17:57 | 22/03/2020 17:57 | | No Battery | | 18:21 | Conf |
| 23/03/2020 | 07:33 | 07:51 | 1 | Avenue Victor Tesch | 07:46 | 23/03/2020 07:46 | | 16:45 | 17:01 | 16:58 | 23/03/2020 16:58 | | Green Light | | 17:20 | Conf |
| 23/03/2020 | 07:33 | 07:51 | 2 | Rue Du Casino | 07:42 | 23/03/2020 07:42 | | 16:45 | 17:01 | 16:54 | 23/03/2020 16:54 | | Red Light | 7:33 -> 0% (until removal) | 17:20 | Conf |
| 23/03/2020 | 07:33 | 07:51 | 3 | Rue Joseph Netzer | 07:38 | 23/03/2020 07:38 | Inactive construction site | 16:45 | 17:01 | 16:50 | 23/03/2020 16:50 | | No Battery | | 17:20 | Conf |
| 24/03/2020 | 07:41 | 07:57 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:45 | 24/03/2020 07:45 | Inactive construction site | 16:44 | 17:03 | 16:49 | 24/03/2020 16:49 | | Red Light | | 17:28 | Conf |
| 24/03/2020 | 07:41 | 07:57 | 2 | Avenue Victor Tesch | 07:54 | 24/03/2020 07:54 | | 16:44 | 17:03 | 16:57 | 24/03/2020 16:57 | | Green Light | | 17:28 | Conf |
| 24/03/2020 | 07:41 | 07:57 | 3 | Rue Du Casino | 07:49 | 24/03/2020 07:49 | | 16:44 | 17:03 | 16:53 | 24/03/2020 16:53 | | No Battery | 7:41 -> 0% (until removal) | 17:28 | Conf |
| 25/03/2020 | 07:38 | 07:54 | 1 | Rue Du Casino | 07:46 | 25/03/2020 07:46 | | 16:44 | 17:00 | 16:52 | 25/03/2020 16:52 | | Red Light | | 17:24 | Conf |
| 25/03/2020 | 07:38 | 07:54 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:42 | 25/03/2020 07:42 | Inactive construction site | 16:44 | 17:00 | 16:48 | 25/03/2020 16:48 | | Red Light | | 17:24 | Conf |
| 25/03/2020 | 07:38 | 07:54 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:51 | 25/03/2020 07:51 | | 16:44 | 17:00 | 16:56 | 25/03/2020 16:56 | | No Battery | 7:38 -> 0% (until removal) | 17:24 | Conf |
| 26/03/2020 | 07:47 | 08:04 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:52 | 26/03/2020 07:52 | Inactive construction site | 16:35 | 16:51 | 16:38 | 26/03/2020 16:38 | | Red Light | | 17:18 | Conf |
| 26/03/2020 | 07:47 | 08:04 | 2 | Avenue Victor Tesch | 08:00 | 26/03/2020 08:00 | | 16:35 | 16:51 | 16:47 | 26/03/2020 16:47 | 15 voitures et 1 bus en 6 minutes | Green Light | 7:47 -> 10% | 17:18 | Conf |
| 26/03/2020 | 07:47 | 08:04 | 3 | Rue Du Casino | 07:56 | 26/03/2020 07:56 | | 16:35 | 16:51 | 16:43 | 26/03/2020 16:43 | | No Battery | 16:35 -> 40% | 17:18 | Conf |
| 27/03/2020 | 07:49 | 08:05 | 1 | Rue Du Casino | 07:55 | 27/03/2020 07:55 | | 16:42 | 17:00 | 16:52 | 27/03/2020 16:52 | | Green Light | | 17:28 | Conf |
| 27/03/2020 | 07:49 | 08:05 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:52 | 27/03/2020 07:52 | Inactive construction site | 16:42 | 17:00 | 16:57 | 27/03/2020 16:57 | | Green Light | 8:05 -> 0% (until removal) | 17:28 | Conf |
| 27/03/2020 | 07:49 | 08:05 | 3 | Avenue Victor Tesch | 08:01 | 27/03/2020 08:01 | Charging battery during the travel. Are there differences with this action ? | 16:42 | 17:00 | 16:47 | 27/03/2020 16:47 | | Red Light | | 16:50 | Conf |
| 28/03/2020 | 07:32 | 07:51 | 1 | Avenue Victor Tesch | 07:47 | 28/03/2020 07:47 | | 16:29 | 16:45 | 16:41 | 28/03/2020 16:41 | | Green Light | | 17:06 | Conf |
| 28/03/2020 | 07:32 | 07:51 | 2 | Rue Du Casino | 07:43 | 28/03/2020 07:43 | | 16:29 | 16:45 | 16:37 | 28/03/2020 16:37 | | Red Light | 7:32 -> 0% | 17:06 | Conf |
| 28/03/2020 | 07:32 | 07:51 | 3 | Rue Joseph Netzer | 07:37 | 28/03/2020 07:37 | | 16:29 | 16:45 | 16:33 | 28/03/2020 16:33 | | Red Light | 16:28 -> 40% | 17:06 | Conf |
| 29/03/2020 | 07:34 | 07:52 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:39 | 29/03/2020 07:39 | | 16:29 | 16:43 | 16:33 | 29/03/2020 16:33 | | Red Light | 7:34 -> 70% | 17:03 | Conf |
| 29/03/2020 | 07:34 | 07:52 | 2 | Rue Du Casino | 07:44 | 29/03/2020 07:44 | | 16:29 | 16:43 | 16:36 | 29/03/2020 16:36 | | Red Light | 7:58 -> 20% | 17:03 | Conf |
| 29/03/2020 | 07:34 | 07:52 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:48 | 29/03/2020 07:48 | Changing hour during night -> CHECK TXT FILES | 16:29 | 16:43 | 16:40 | 29/03/2020 16:40 | Starting raining/snowing at 16:25 on Arlon | No Battery | 9:15 (from Messancy) -> 60% 13:05 (from Messancy) -> 80% 14:19 (from Messancy) -> 100% until removal | 17:03 | Conf |
| 30/03/2020 | 07:48 | 08:08 | 1 | Rue Du Casino | 08:01 | 30/03/2020 08:01 | | 16:38 | 16:52 | 16:45 | 30/03/2020 16:45 | | Red Light | 7:48 -> 0% | 17:52 | Conf |
| 30/03/2020 | 07:48 | 08:08 | 2 | Avenue Victor Tesch | 07:54 | 30/03/2020 07:54 | Negative temperature during the setup | 16:38 | 16:52 | 16:49 | 30/03/2020 16:49 | | Green Light | 8:08 -> 0% | 17:52 | Conf |
| 30/03/2020 | 07:48 | 08:08 | 3 | Rue Joseph Netzer | 08:05 | 30/03/2020 08:05 | Filling battery during the travel | 16:38 | 16:52 | 16:42 | 30/03/2020 16:42 | | No Battery | 16:53 -> 0% | 17:52 | Conf |
| 31/03/2020 | 10:31 | 10:45 | 1 | Avenue Victor Tesch | 10:42 | 31/03/2020 10:42 | | 16:38 | 16:52 | 16:49 | 31/03/2020 16:49 | | Green Light | 10:45 -> 20-30% | 17:12 | Conf |
| 31/03/2020 | 10:31 | 10:45 | 2 | Rue Joseph Netzer | 10:34 | 31/03/2020 10:34 | Charging problem. That's the reason for late setup. Sensor 1 wasn't fully charged. | 16:38 | 16:52 | 16:42 | 31/03/2020 16:42 | | Green Light | 10:50 -> 90% (entrance Arlon) | 17:12 | Conf |
| 31/03/2020 | 10:31 | 10:45 | 3 | Rue Du Casino | 10:37 | 31/03/2020 10:37 | | 16:38 | 16:52 | 16:45 | 31/03/2020 16:45 | | Red Light | 11:42 -> 0% (until removal) | 17:12 | Conf |
| 01/04/2020 | 07:45 | 08:01 | 1 | Rue Du Casino | 07:53 | 01/04/2020 07:53 | | 16:41 | 16:54 | 16:46 | 01/04/2020 16:46 | | Red Light | | 17:21 | Conf |
| 01/04/2020 | 07:45 | 08:01 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:48 | 01/04/2020 07:48 | Negative temperature during the setup | 16:41 | 16:54 | 16:44 | 01/04/2020 16:44 | | Red Light | 8:01 -> 0% (until removal) | 17:21 | Conf |
| 01/04/2020 | 07:45 | 08:01 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:57 | 01/04/2020 07:57 | | 16:41 | 16:54 | 16:50 | 01/04/2020 16:50 | | Red Light | | 17:21 | Conf |
| 02/04/2020 | 07:54 | 08:10 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:59 | 02/04/2020 07:59 | | 16:46 | 16:59 | 16:49 | 02/04/2020 16:49 | | Green Light | | 17:22 | Conf |
| 02/04/2020 | 07:54 | 08:10 | 2 | Rue Du Casino | 08:03 | 02/04/2020 08:03 | Negative temperature during the setup | 16:46 | 16:59 | 16:52 | 02/04/2020 16:52 | | Green Light | 8:10 -> 0% (until removal) | 17:22 | Conf |
| 02/04/2020 | 07:54 | 08:10 | 3 | Avenue Victor Tesch | 08:07 | 02/04/2020 08:07 | | 16:46 | 16:59 | 16:56 | 02/04/2020 16:56 | | Red Light | | 17:22 | Conf |
| 03/04/2020 | 07:53 | 08:11 | 1 | Rue Du Casino | 08:02 | 03/04/2020 08:02 | | 16:48 | 17:01 | 16:54 | 03/04/2020 16:54 | | Green Light | | 17:24 | Conf |
| 03/04/2020 | 07:53 | 08:11 | 2 | Avenue Victor Tesch | 08:06 | 03/04/2020 08:06 | | 16:48 | 17:01 | 16:58 | 03/04/2020 16:58 | | Red Light | | 17:24 | Conf |
| 03/04/2020 | 07:53 | 08:11 | 3 | Rue Joseph Netzer | 07:58 | 03/04/2020 07:58 | | 16:48 | 17:01 | 16:51 | 03/04/2020 16:51 | | Red Light | 7:56 -> 100% | 17:24 | Conf |
| 04/04/2020 | 07:44 | 07:59 | 1 | Avenue Victor Tesch | 07:55 | 04/04/2020 07:55 | | 16:33 | 16:46 | 16:42 | 04/04/2020 16:42 | | Green Light | | 17:07 | Conf |
| 04/04/2020 | 07:44 | 07:59 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:47 | 04/04/2020 07:47 | | 16:33 | 16:46 | 16:36 | 04/04/2020 16:36 | | Green Light | 11:35 -> 0% (until removal) | 17:07 | Conf |
| 04/04/2020 | 07:44 | 07:59 | 3 | Rue Du Casino | 07:51 | 04/04/2020 07:51 | | 16:33 | 16:46 | 16:39 | 04/04/2020 16:39 | | Green Light | | 17:07 | Conf |
| 10/04/2020 | 07:37 | 07:53 | 1 | Rue Joseph Netzer | 07:41 | 10/04/2020 07:41 | | 16:31 | 16:47 | 16:35 | 10/04/2020 16:35 | | Red Light | | 17:10 | Conf |
| 10/04/2020 | 07:37 | 07:53 | 2 | Rue Du Casino | 07:45 | 10/04/2020 07:45 | | 16:31 | 16:47 | 16:38 | 10/04/2020 16:38 | | Red Light | 7:41 -> 0% | 17:10 | Conf |
| 10/04/2020 | 07:37 | 07:53 | 3 | Avenue Victor Tesch | 07:49 | 10/04/2020 07:49 | | 16:31 | 16:47 | 16:42 | 10/04/2020 16:42 | | Red Light | 14:36 (from Messancy) -> 40% | 17:10 | Conf |
| 11/04/2020 | 07:54 | 08:12 | 1 | Avenue Victor Tesch | 08:08 | 11/04/2020 08:08 | | 16:41 | 16:55 | 16:52 | 11/04/2020 16:52 | | Green Light | | 17:15 | Conf |
| 11/04/2020 | 07:54 | 08:12 | 2 | Rue Joseph Netzer | 07:59 | 11/04/2020 07:59 | | 16:41 | 16:55 | 16:46 | 11/04/2020 16:46 | | Green Light | 7:54 -> 0% | 17:15 | Conf |
| 11/04/2020 | 07:54 | 08:12 | 3 | Rue Du Casino | 08:03 | 11/04/2020 08:03 | | 16:41 | 16:55 | 16:49 | 11/04/2020 16:49 | | Red Light | 15:20 (from Messancy) -> 70% | 17:15 | Conf |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|---|---------------------|-------|------------------|--|-------|-------|-------|------------------|-------------------------------|-------------|--|------------------------------|-------|----------|
| 16/04/2020 | 07:08 | 07:21 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:14 | 16/04/2020 07:14 | | 16:42 | 16:56 | 16:49 | 16/04/2020 16:49 | | Green_Light | | 7:11 -> 0% | 17:28 | Conf |
| 16/04/2020 | 07:08 | 07:21 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:18 | 16/04/2020 07:18 | | 16:42 | 16:56 | 16:53 | 16/04/2020 16:53 | | Red_Light | | 13:14 (from Messancy) -> 80% | 17:28 | Conf |
| 16/04/2020 | 07:08 | 07:21 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:11 | 16/04/2020 07:11 | | 16:42 | 16:56 | 16:46 | 16/04/2020 16:46 | | No_Battery | | 16:42 -> 0% | 17:28 | Conf |
| 17/04/2020 | 07:24 | 07:38 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:28 | 17/04/2020 07:28 | | 16:41 | 16:55 | 16:45 | 17/04/2020 16:45 | | Green_Light | | | 17:22 | Conf |
| 17/04/2020 | 07:24 | 07:38 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:35 | 17/04/2020 07:35 | | 16:41 | 16:55 | 16:52 | 17/04/2020 16:52 | | Green_Light | | 7:38 -> 10% | 17:22 | Conf |
| 17/04/2020 | 07:24 | 07:38 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:31 | 17/04/2020 07:31 | Battery not fully charged | 16:41 | 16:55 | 16:48 | 17/04/2020 16:48 | | Red_Light | | 16:41 -> 60% | 17:22 | Conf |
| 20/04/2020 | 07:24 | 07:40 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:32 | 20/04/2020 07:32 | | 16:21 | 16:39 | 16:28 | 20/04/2020 16:28 | | Green_Light | | | 16:58 | Conf |
| 20/04/2020 | 07:24 | 07:40 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:36 | 20/04/2020 07:36 | | 16:21 | 16:39 | 16:32 | 20/04/2020 16:32 | | Green_Light | | | 16:58 | Conf |
| 20/04/2020 | 07:24 | 07:40 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:28 | 20/04/2020 07:28 | Construction site is active again | 16:21 | 16:39 | 16:25 | 20/04/2020 16:25 | | Red_Light | | 7:25 -> 0% (until removal) | 16:58 | Conf |
| 21/04/2020 | 07:32 | 07:48 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:45 | 21/04/2020 07:45 | | 16:26 | 16:40 | 16:37 | 21/04/2020 16:37 | | Green_Light | | | 17:03 | Conf |
| 21/04/2020 | 07:32 | 07:48 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:37 | 21/04/2020 07:37 | Truck delivery for the construction site during the setup. Active construction site. | 16:26 | 16:40 | 16:30 | 21/04/2020 16:30 | | Green_Light | | | 17:03 | Conf |
| 21/04/2020 | 07:32 | 07:48 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:41 | 21/04/2020 07:41 | | 16:26 | 16:40 | 16:33 | 21/04/2020 16:33 | | Red_Light | | 7:33 -> 0% (until removal) | 17:03 | Conf |
| 22/04/2020 | 07:33 | 07:46 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:36 | 22/04/2020 07:36 | Active construction site | 16:03 | 16:17 | 16:06 | 22/04/2020 16:06 | | Green_Light | | | 16:48 | Conf |
| 22/04/2020 | 07:33 | 07:46 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:42 | 22/04/2020 07:42 | | 16:03 | 16:17 | 16:14 | 22/04/2020 16:14 | | Green_Light | | 7:43 -> 0% (until removal) | 16:48 | Conf |
| 22/04/2020 | 07:33 | 07:46 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:39 | 22/04/2020 07:39 | | 16:03 | 16:17 | 16:10 | 22/04/2020 16:10 | | Red_Light | | | 16:48 | Conf |
| 23/04/2020 | 07:30 | 07:45 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:41 | 23/04/2020 07:41 | | 16:15 | 16:31 | 16:26 | 23/04/2020 16:26 | | Green_Light | | | 16:49 | Conf |
| 23/04/2020 | 07:30 | 07:45 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:37 | 23/04/2020 07:37 | | 16:15 | 16:31 | 16:21 | 23/04/2020 16:21 | | Green_Light | | 7:30 -> 0% (until removal) | 16:49 | Conf |
| 23/04/2020 | 07:30 | 07:45 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:34 | 23/04/2020 07:34 | Active construction site | 16:15 | 16:31 | 16:19 | 23/04/2020 16:19 | | Red_Light | | | 16:49 | Conf |
| 24/04/2020 | 07:32 | 07:46 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:39 | 24/04/2020 07:39 | | 15:53 | 16:06 | 16:00 | 24/04/2020 16:00 | | Green_Light | | | 16:39 | Conf |
| 24/04/2020 | 07:32 | 07:46 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:36 | 24/04/2020 07:36 | Active construction site | 15:53 | 16:06 | 15:56 | 24/04/2020 15:56 | | Red_Light | | 7:32 -> 0% (until removal) | 16:39 | Conf |
| 24/04/2020 | 07:32 | 07:46 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:42 | 24/04/2020 07:42 | | 15:53 | 16:06 | 16:03 | 24/04/2020 16:03 | | Red_Light | | | 16:39 | Conf |
| 25/04/2020 | 07:44 | 07:58 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:47 | 25/04/2020 07:47 | Inactive construction site (Saturday) | 16:28 | 16:43 | 16:31 | 25/04/2020 16:31 | | Red_Light | | | 17:09 | Conf |
| 25/04/2020 | 07:44 | 07:58 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:50 | 25/04/2020 07:50 | | 16:28 | 16:43 | 16:35 | 25/04/2020 16:35 | | Green_Light | | 7:44 -> 0% (until removal) | 17:09 | Conf |
| 25/04/2020 | 07:44 | 07:58 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:54 | 25/04/2020 07:54 | | 16:28 | 16:43 | 16:39 | 25/04/2020 16:39 | | Red_Light | | | 17:09 | Conf |
| 04/05/2020 | 07:25 | 07:43 | 1 | | | | Problem with box 1, it wasn't set. It has to be repaired | | | | | | | | | | Phase 1A |
| 04/05/2020 | 07:25 | 07:43 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:39 | 04/05/2020 07:39 | The quarantine is over, new phase starting. Wet/rainy weather | 16:23 | 16:35 | 16:31 | 04/05/2020 16:31 | | Green_Light | | 7:30 -> 90% (until removal) | 16:58 | Phase 1A |
| 04/05/2020 | 07:25 | 07:43 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:29 | 04/05/2020 07:29 | Sensor was placed at the same spot as usual but under a roof | 16:23 | 16:35 | 16:26 | 04/05/2020 16:26 | | Red_Light | | | 16:58 | Phase 1A |
| 05/05/2020 | | | 1 | | | | Problem with box 1, it wasn't set. It has to be repaired | | | | | | | | | | Phase 1A |
| 05/05/2020 | 07:28 | 07:38 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:32 | 05/05/2020 07:32 | Cold and wet weather and active construction site | 16:24 | 16:34 | 16:28 | 05/05/2020 16:28 | | Red_Light | | 7:37 -> 100% | 16:56 | Phase 1A |
| 05/05/2020 | 07:28 | 07:38 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:35 | 05/05/2020 07:35 | Since the quarantine is over, around 3 times more vehicles. | 16:24 | 16:34 | 16:33 | 05/05/2020 16:33 | | Red_Light | | Around 11h -> 30% (Messancy) | 16:56 | Phase 1A |
| 06/05/2020 | | | 1 | | | | Problem with box 1, it wasn't set. It has to be repaired | | | | | | | | 16:24 -> 10% | 16:56 | Phase 1A |
| 06/05/2020 | 07:29 | 07:40 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:31 | 06/05/2020 07:31 | Cold weather but not wet. | 17:12 | 17:21 | 17:15 | 06/05/2020 17:15 | | Red_Light | | | 17:46 | Phase 1A |
| 06/05/2020 | 07:29 | 07:40 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:37 | 06/05/2020 07:37 | | 17:12 | 17:21 | 17:18 | 06/05/2020 17:18 | | No_Battery | | 7:31 -> 0% (until removal) | 17:46 | Phase 1A |
| The hour has been corrected inside the sensors | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Check the hours in the txt files to see the changes | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08/05/2020 | 09:17 | 09:35 | 1 | | | | Problem with box 1, it wasn't set. It has to be repaired | | | | | | | | | | Phase 1A |
| 08/05/2020 | 09:17 | 09:35 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 09:26 | 08/05/2020 09:26 | Truck delivery for the construction site during the setup. Active construction site. | 16:49 | 17:07 | 16:52 | 08/05/2020 16:52 | | Red_Light | | 9:17 -> 30% (until removal) | 17:34 | Phase 1A |
| 08/05/2020 | 09:17 | 09:35 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 09:32 | 08/05/2020 09:32 | Small construction site producing a lot of dust (entry Rue du Casino) | 16:49 | 17:07 | 17:03 | 08/05/2020 17:03 | | Red_Light | | | 17:34 | Phase 1A |
| 12/05/2020 | | | 1 | | | | Problem with box 1, it wasn't set. It has to be repaired | | | | | | | | | | Phase 1B |
| 12/05/2020 | 07:23 | 07:33 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:32 | 12/05/2020 07:32 | End construction site Rue des Deportés and the small construction site | 16:28 | 16:37 | 16:35 | 12/05/2020 16:35 | | Red_Light | | 7:28 -> 0% | 17:02 | Phase 1B |
| 12/05/2020 | 07:23 | 07:33 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:28 | 12/05/2020 07:28 | | 16:28 | 16:37 | 16:32 | 12/05/2020 16:32 | | Red_Light | | 16:28 -> 40% | 17:02 | Phase 1B |
| 13/05/2020 | 07:27 | 07:46 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:35 | 13/05/2020 07:35 | Red light when starting but txt files were created | 16:45 | 16:59 | 16:48 | 13/05/2020 16:48 | | Red_Light | | | 17:18 | Phase 1B |
| 13/05/2020 | 07:27 | 07:46 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:39 | 13/05/2020 07:39 | | 16:45 | 16:59 | 16:51 | 13/05/2020 16:51 | | Red_Light | | 7:39 -> 10% (until removal) | 17:18 | Phase 1B |
| 13/05/2020 | 07:27 | 07:46 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:42 | 13/05/2020 07:42 | | 16:45 | 16:59 | 16:55 | 13/05/2020 16:55 | | No_Battery | | | 17:18 | Phase 1B |
| 14/05/2020 | 07:21 | 07:37 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:33 | 14/05/2020 07:33 | Red light when starting but txt files were created | 16:31 | 16:44 | 16:41 | 14/05/2020 16:41 | | Red_Light | | 7:33 -> 0% | 17:04 | Phase 1B |
| 14/05/2020 | 07:21 | 07:37 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:26 | 14/05/2020 07:26 | | 16:31 | 16:44 | 16:35 | 14/05/2020 16:35 | | Red_Light | | 16:31 -> 30% | 17:04 | Phase 1B |
| 14/05/2020 | 07:21 | 07:37 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:30 | 14/05/2020 07:30 | Not fully charged | 16:31 | 16:44 | 16:38 | 14/05/2020 16:38 | | No_Battery | | | 17:04 | Phase 1B |
| 15/05/2020 | 07:25 | 07:40 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:33 | 15/05/2020 07:33 | Red light when starting but txt files were created | 15:53 | 16:05 | 15:56 | 15/05/2020 15:56 | | Red_Light | | 7:30 -> 0% (until removal) | 16:31 | Phase 1B |
| 15/05/2020 | 07:25 | 07:40 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:37 | 15/05/2020 07:37 | | 15:53 | 16:05 | 16:01 | 15/05/2020 16:01 | | Red_Light | | | 16:31 | Phase 1B |
| 15/05/2020 | 07:25 | 07:40 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:30 | 15/05/2020 07:30 | Problem with the refill, check the txt files | 15:53 | 16:05 | 11:50 | 15/05/2020 11:50 | There was a charging problem. | No_Battery | | | 12:42 | Phase 1B |
| 18/05/2020 | 07:11 | 07:29 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:19 | 18/05/2020 07:19 | Red light when starting but txt files were created | 16:40 | 16:57 | 16:47 | 18/05/2020 16:47 | | Red_Light | | | 17:31 | Phase 2 |
| 18/05/2020 | 07:11 | 07:29 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:26 | 18/05/2020 07:26 | Starting roof renovation site Tesch. | 16:40 | 16:57 | 16:53 | 18/05/2020 16:53 | | Green_Light | | 7:19 -> 0% (until removal) | 17:31 | Phase 2 |
| 18/05/2020 | 07:11 | 07:29 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:23 | 18/05/2020 07:23 | | 16:40 | 16:57 | 16:50 | 18/05/2020 16:50 | | Red_Light | | | 17:31 | Phase 2 |
| 21/05/2020 | 07:08 | 07:27 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:22 | 21/05/2020 07:22 | Red light when starting but txt files were created | 16:28 | 16:42 | 16:38 | 21/05/2020 16:38 | | Red_Light | | | 17:08 | Phase 2 |
| 21/05/2020 | 07:08 | 07:27 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:18 | 21/05/2020 07:18 | 1st open air market since the quarantine | 16:28 | 16:42 | 16:34 | 21/05/2020 16:34 | | Green_Light | | 7:13 -> 0% (until removal) | 17:08 | Phase 2 |
| 21/05/2020 | 07:08 | 07 | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|---|---------------------|-------|------------------|--|-------|-------|-------|------------------|--|-------------|--|-------|---------|
| 29/05/2020 | 07:26 | 07:41 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:29 | 29/05/2020 07:29 | Red light when starting but txt files were created | 16:58 | 17:12 | 17:02 | 29/05/2020 17:02 | | Red_Light | | 17:33 | Phase 2 |
| 29/05/2020 | 07:26 | 07:41 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:32 | 29/05/2020 07:32 | | 16:58 | 17:12 | 17:05 | 29/05/2020 17:05 | | Red_Light | | 17:33 | Phase 2 |
| 29/05/2020 | 07:26 | 07:41 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:37 | 29/05/2020 07:37 | Not fully charged | 16:58 | 17:12 | 17:09 | 29/05/2020 17:09 | | No_Battery | | 17:33 | Phase 2 |
| 08/06/2020 | 07:28 | 07:42 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:34 | 08/06/2020 07:34 | Rainy between 12 and 13 o'clock | 16:36 | 16:50 | 16:43 | 08/06/2020 16:43 | | Red_Light | 07:38 -> 30% | 17:26 | Phase 3 |
| 08/06/2020 | 07:28 | 07:42 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:38 | 08/06/2020 07:38 | | 16:36 | 16:50 | 16:46 | 08/06/2020 16:46 | | Green_Light | 12:00 to 13:00 (approximately) -> 100% | 17:26 | Phase 3 |
| 08/06/2020 | 07:28 | 07:42 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:31 | 08/06/2020 07:31 | | 16:36 | 16:50 | 16:39 | 08/06/2020 16:39 | | Red_Light | 16:39 -> 30% | 17:26 | Phase 3 |
| 09/06/2020 | 07:16 | 07:35 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:30 | 09/06/2020 07:30 | | 16:59 | 17:16 | 17:12 | 09/06/2020 17:12 | | Red_Light | 7:23 -> 70% | 17:41 | Phase 3 |
| 09/06/2020 | 07:16 | 07:35 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:26 | 09/06/2020 07:26 | | 16:59 | 17:16 | 17:00 | 09/06/2020 17:00 | | Red_Light | 15:40 -> 100% (rain) | 17:41 | Phase 3 |
| 09/06/2020 | 07:16 | 07:35 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:22 | 09/06/2020 07:22 | Not fully charged | 16:59 | 17:16 | 17:05 | 09/06/2020 17:05 | | Red_Light | | 17:41 | Phase 3 |
| 11/06/2020 | 07:25 | 07:38 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:30 | 11/06/2020 07:30 | | 16:56 | 17:12 | 17:03 | 11/06/2020 17:03 | | Red_Light | | 17:26 | Phase 3 |
| 11/06/2020 | 07:25 | 07:38 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:27 | 11/06/2020 07:27 | | 16:56 | 17:12 | 16:59 | 11/06/2020 16:59 | | Green_Light | 7:28 -> 90% | 17:26 | Phase 3 |
| 11/06/2020 | 07:25 | 07:38 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:34 | 11/06/2020 07:34 | | 16:56 | 17:12 | 17:07 | 11/06/2020 17:07 | | No_Battery | 16:56 -> 60% | 17:26 | Phase 3 |
| 12/06/2020 | 07:33 | 07:50 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:46 | 12/06/2020 07:46 | Windier than usual | 16:49 | 17:06 | 17:02 | 12/06/2020 17:02 | | Red_Light | | 17:33 | Phase 3 |
| 12/06/2020 | 07:33 | 07:50 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:37 | 12/06/2020 07:37 | | 16:49 | 17:06 | 16:52 | 12/06/2020 16:52 | | Red_Light | 7:37 -> 30% | 17:33 | Phase 3 |
| 12/06/2020 | 07:33 | 07:50 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:42 | 12/06/2020 07:42 | | 16:49 | 17:06 | 16:58 | 12/06/2020 16:58 | | Green_Light | | 17:33 | Phase 3 |
| 16/06/2020 | 07:42 | 07:57 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:45 | 16/06/2020 07:45 | | 17:05 | 17:19 | 17:08 | 16/06/2020 17:08 | | Red_Light | | 17:42 | Phase 3 |
| 16/06/2020 | 07:42 | 07:57 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:49 | 16/06/2020 07:49 | | 17:05 | 17:19 | 17:12 | 16/06/2020 17:12 | | Red_Light | 7:45 -> 0% | 17:42 | Phase 3 |
| 16/06/2020 | 07:42 | 07:57 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:53 | 16/06/2020 07:53 | | 17:05 | 17:19 | 17:16 | 16/06/2020 17:16 | | Red_Light | 17:05 -> 30% | 17:42 | Phase 3 |
| 18/06/2020 | 07:29 | 07:46 | 1 | Rue_Du_Casino | 07:38 | 18/06/2020 07:38 | rainy weather | 16:42 | 16:57 | 16:50 | 18/06/2020 16:50 | | Red_Light | | 17:27 | Phase 3 |
| 18/06/2020 | 07:29 | 07:46 | 2 | Avenue_Victor_Tesch | 07:42 | 18/06/2020 07:42 | | 16:42 | 16:57 | 16:54 | 18/06/2020 16:54 | | Red_Light | 7:42 -> 100% | 17:27 | Phase 3 |
| 18/06/2020 | 07:29 | 07:46 | 3 | Rue_Joseph_Netzer | 07:34 | 18/06/2020 07:34 | Sensor was placed at the same spot as usual but under a roof | 16:42 | 16:57 | 16:46 | 18/06/2020 16:46 | | No_Battery | | 17:27 | Phase 3 |
| 19/06/2020 | 07:42 | 07:58 | 1 | Avenue_Victor_Tesch | 07:54 | 19/06/2020 07:54 | | 16:22 | 16:37 | 16:33 | 19/06/2020 16:33 | | No_Battery | | 16:59 | Phase 3 |
| 19/06/2020 | 07:42 | 07:58 | 2 | Rue_Joseph_Netzer | 07:46 | 19/06/2020 07:46 | | 16:22 | 16:37 | 16:27 | 19/06/2020 16:27 | | Red_Light | 7:46 -> 0% | 16:59 | Phase 3 |
| 19/06/2020 | 07:42 | 07:58 | 3 | Rue_Du_Casino | 07:50 | 19/06/2020 07:50 | Not fully charged | 16:22 | 16:37 | 16:25 | 19/06/2020 16:25 | | Red_Light | | 16:59 | Phase 3 |
| 25/06/2020 | 07:22 | 07:36 | 1 | Rue_Joseph_Netzer | 07:25 | 25/06/2020 07:25 | | 16:46 | 17:00 | 16:49 | 25/06/2020 16:49 | | Red_Light | | 17:26 | Phase 3 |
| 25/06/2020 | 07:22 | 07:36 | 2 | Rue_Du_Casino | 07:28 | 25/06/2020 07:28 | | 16:46 | 17:00 | 16:52 | 25/06/2020 16:52 | | Green_Light | 7:25 -> 0% | 17:26 | Phase 3 |
| 25/06/2020 | 07:22 | 07:36 | 3 | Avenue_Victor_Tesch | 07:32 | 25/06/2020 07:32 | | 16:46 | 17:00 | 16:56 | 25/06/2020 16:56 | | No_Battery | | 17:26 | Phase 3 |

Annexe 8 : Tableau synthétique des paramètres impliqués dans le phénomène de dispersion en milieu urbain – rue canyon

| Notation | Définition du paramètre | Influence | Degré d'importance de la prise en compte de ce paramètre ³ |
|---|--|---|---|
| Paramètres géométriques | | | |
| H/W | Rapport d'aspect avec H la hauteur du canyon et W sa largeur | Contribue à la définition des régimes d'écoulement qui s'établissent dans la rue | P1 |
| %bâti | Taux de bâti le long de la rue | Influence directement la dispersion dans la mesure où l'on ne peut plus s'attendre à des phénomènes de rue canyon dans le cas d'un bâti dispersé | P2 |
| H1, H2 | Hauteurs des bâtiments de part et d'autre de la rue | Influence la géométrie de l'écoulement si ces quantités sont très différentes | P2 |
| Obst | Recensement d'obstacles dans la rue | Influence la géométrie de l'écoulement et le positionnement des zones de fortes concentrations | P3 |
| Paramètres météorologiques | | | |
| DD/U | Direction/vitesse de vent | DD Contribue à qualifier la nature de la dispersion du panache U conditionne également la dispersion, des conditions stagnantes très défavorables à la dispersion étant constatées par vent faible | P1 |
| HM | Hauteur de mélange | Quantifie la hauteur sur laquelle les polluants peuvent se mélanger. Si elle est très basse, faible dispersion. | P2 |
| U*, L | Vitesse de friction, longueur de Monin Obukhov | Facteurs d'échelle permettant de qualifier la turbulence atmosphérique ; dépendent également de la rugosité. Ces quantités ne sont généralement pas directement estimées ou utilisées dans les modèles de rue | P3 |
| T | Température ambiante | Contribue à qualifier les conditions de dispersion | P3 |
| T_{bat} | Température des bâtiments | Influence les conditions de développement des zones tourbillonnaires | P3 |
| Paramètres d'émission | | | |
| N_v | Nombre de véhicules moyen journalier circulant dans la rue | Nécessaire pour évaluer les émissions | P1 |
| V_v | Vitesse moyenne des véhicules | Nécessaire pour évaluer les émissions | P1 |
| %PL | Pourcentage de poids lourds dans la flotte | Détermine les émissions totales | P2 |
| Circ | Paramètres de circulation (% de « bouchons ») | Détermine les émissions totales | P2 |
| P | Pente de la rue | Détermine les émissions totales ; généralement pris en compte dans les logiciels de calcul des émissions | P2 |
| Paramètres de « background » de la pollution | | | |
| C_b | Concentration de fond du polluant considéré | Indispensable à l'évaluation des concentrations | P1 |
| Eint | Fortes Emissions du trafic au voisinage de la rue, dues à une intersection par exemple | Peut contribuer à ajuster C _b | P3 |
| d_{pop} | Densité de population | Peut contribuer à ajuster C _b | P3 |
| %ind | Détection de la présence éventuelle d'industries au voisinage de la rue | Peut contribuer à ajuster C _b | P3 |

P1 = indispensable
P2 = recommandé
P3 = paramètre influant mais généralement « oublié » car difficile à

Source : (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 2004)

Annexe 9 - Résultats du test statistique du trafic 2020 en fonction de la variable qualitative Période + Rue

| mediane.1 | mediane.2 | test | p.value | Holm |
|---------------------------|---------------------------|--------|-------------|----------|
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | Conf1.Rue_du_Casino | Wilcox | 6.80E-08 | 1.30E-05 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | Conf1.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.276627061 | 1 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | Conf2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.00774742 | 0.402866 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | Conf2.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.01E-07 | 1.80E-05 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | Conf2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.007124456 | 0.388544 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.001639584 | 0.126248 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 2.25E-06 | 0.000354 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000975192 | 0.08193 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.002092272 | 0.143144 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 2.25E-06 | 0.000354 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000975192 | 0.08193 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000274123 | 0.030428 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 3.37E-07 | 5.70E-05 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 4.28E-05 | 0.006119 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 2.70E-05 | 0.003892 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 4.50E-06 | 0.000667 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 5.00E-09 | 1.00E-06 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0 | 0 |
| Conf1.Rue_du_Casino | Conf1.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 6.80E-08 | 1.30E-05 |
| Conf1.Rue_du_Casino | Conf2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Rue_du_Casino | Conf2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.921637396 | 1 |
| Conf1.Rue_du_Casino | Conf2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P1A.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.00011982 | 0.015013 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.028805613 | 0.92178 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.00011982 | 0.015013 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.00011982 | 0.015013 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.001765966 | 0.130681 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.00011982 | 0.015013 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.002940704 | 0.188205 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 1.01E-07 | 1.80E-05 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.00011982 | 0.015013 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.001460848 | 0.115407 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.00011982 | 0.015013 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 9.80E-06 | 0.001441 |
| Conf1.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 3.20E-08 | 6.00E-06 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | Conf2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.002666577 | 0.173328 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | Conf2.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.01E-07 | 1.80E-05 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | Conf2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.003525983 | 0.222137 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P1A.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.001639584 | 0.126248 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 2.25E-06 | 0.000354 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000738714 | 0.065007 |

| mediane.1 | mediane.2 | test | p.value | Holm |
|---------------------------|-------------------------|--------|-------------|----------|
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.001639584 | 0.126248 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 2.25E-06 | 0.000354 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000738714 | 0.065007 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000147584 | 0.016677 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 4.60E-08 | 9.00E-06 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 7.90E-08 | 1.40E-05 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1.58E-05 | 0.002286 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000209262 | 0.023437 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 2.25E-06 | 0.000354 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 3.00E-09 | 1.00E-06 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 5.40E-08 | 1.00E-05 |
| Conf1.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0 | 0 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | Conf2.Rue_du_Casino | Wilcox | 7.00E-08 | 1.30E-05 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | Conf2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.960308001 | 1 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.004726192 | 0.288298 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.002494848 | 0.16466 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.006998074 | 0.388544 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.001569204 | 0.122398 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.013687473 | 0.629624 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000551225 | 0.059532 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000952671 | 0.08193 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 7.60E-05 | 0.010718 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1.30E-07 | 2.20E-05 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| Conf2.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 2.00E-09 | 0 |
| Conf2.Rue_du_Casino | Conf2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 7.00E-08 | 1.30E-05 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P1A.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000135309 | 0.016102 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.040051879 | 1 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000135309 | 0.016102 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000135309 | 0.016102 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.006570287 | 0.381077 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000135309 | 0.016102 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 7.00E-08 | 1.30E-05 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.006753157 | 0.38493 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 1.48E-07 | 2.50E-05 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000135309 | 0.016102 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.001792224 | 0.130832 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000135309 | 0.016102 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 7.00E-08 | 1.30E-05 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.56E-05 | 0.002271 |
| Conf2.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 5.00E-08 | 9.00E-06 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P1A.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.004726192 | 0.288298 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.001988109 | 0.143144 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.010122969 | 0.516271 |

| mediane.1 | mediane.2 | test | p.value | Holm |
|-------------------------|-------------------------|--------|-------------|----------|
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.001229688 | 0.098375 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.011880436 | 0.55838 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000435994 | 0.047523 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000952671 | 0.08193 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.38E-06 | 0.000503 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 5.07E-05 | 0.007196 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1.60E-07 | 2.70E-05 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| Conf2.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 2.00E-09 | 0 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.259324009 | 1 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1 | 1 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.026223776 | 0.891608 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.524283225 | 1 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.333879599 | 1 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.001988109 | 0.143144 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1A.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000420303 | 0.046233 |
| P1A.Rue_du_Casino | P1A.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_du_Casino | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_du_Casino | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.382867133 | 1 |
| P1A.Rue_du_Casino | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_du_Casino | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1A.Rue_du_Casino | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.54165722 | 1 |
| P1A.Rue_du_Casino | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 3.04E-06 | 0.000462 |
| P1A.Rue_du_Casino | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_du_Casino | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.026223776 | 0.891608 |
| P1A.Rue_du_Casino | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_du_Casino | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| P1A.Rue_du_Casino | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.022506343 | 0.810228 |
| P1A.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 1.28E-06 | 0.000215 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.804778555 | 1 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.128205128 | 1 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.915482268 | 1 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.435077559 | 1 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.001988109 | 0.143144 |
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |

| mediane.1 | mediane.2 | test | p.value | Holm |
|-------------------------|------------------------|--------|-------------|----------|
| P1A.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.00119043 | 0.096666 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.053030303 | 1 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.63295796 | 1 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.363505625 | 1 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.001988109 | 0.143144 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1B.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000722716 | 0.064322 |
| P1B.Rue_du_Casino | P1B.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1B.Rue_du_Casino | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1B.Rue_du_Casino | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.852643813 | 1 |
| P1B.Rue_du_Casino | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 3.04E-06 | 0.000462 |
| P1B.Rue_du_Casino | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1B.Rue_du_Casino | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.097319347 | 1 |
| P1B.Rue_du_Casino | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1B.Rue_du_Casino | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| P1B.Rue_du_Casino | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.046575777 | 1 |
| P1B.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 1.28E-06 | 0.000215 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P2.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.559426342 | 1 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.865551839 | 1 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.017482517 | 0.769231 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.004726192 | 0.288298 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P1B.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.002359077 | 0.158058 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.464595099 | 1 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.010864488 | 0.53236 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.010864488 | 0.53236 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.004132445 | 0.256212 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| P2.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.001178857 | 0.096666 |
| P2.Rue_du_Casino | P2.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 7.00E-08 | 1.30E-05 |
| P2.Rue_du_Casino | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P2.Rue_du_Casino | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.014650657 | 0.65928 |
| P2.Rue_du_Casino | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P2.Rue_du_Casino | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| P2.Rue_du_Casino | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.064433027 | 1 |
| P2.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 2.10E-08 | 4.00E-06 |
| P2.Rue_Joseph_Netzer | P3.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.025472788 | 0.891548 |
| P2.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.04E-06 | 0.000462 |
| P2.Rue_Joseph_Netzer | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.01034661 | 0.51733 |

| mediane.1 | mediane.2 | test | p.value | Holm |
|------------------------|------------------------|--------|-------------|----------|
| P2.Rue_Joseph_Netzer | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.006938286 | 0.388544 |
| P2.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 7.00E-08 | 1.30E-05 |
| P2.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.006973597 | 0.388544 |
| P3.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P3.Avenue_Victor_Tesch | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 1 | 1 |
| P3.Avenue_Victor_Tesch | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.15527516 | 1 |
| P3.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P3.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.671825626 | 1 |
| P3.Rue_du_Casino | P3.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.000582751 | 0.062354 |
| P3.Rue_du_Casino | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 1.69E-06 | 0.000279 |
| P3.Rue_du_Casino | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.117448162 | 1 |
| P3.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 1.28E-06 | 0.000215 |
| P3.Rue_Joseph_Netzer | P4.Avenue_Victor_Tesch | Wilcox | 0.189265565 | 1 |
| P3.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 0.000107237 | 0.015013 |
| P3.Rue_Joseph_Netzer | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.671825626 | 1 |
| P4.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_du_Casino | Wilcox | 3.10E-08 | 6.00E-06 |
| P4.Avenue_Victor_Tesch | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 0.727300247 | 1 |
| P4.Rue_du_Casino | P4.Rue_Joseph_Netzer | Wilcox | 2.10E-08 | 4.00E-06 |

Annexe 10 - Résultats du test statistique des concentrations en PM_{2,5} mesurées en fonction de la variable qualitative Période + Rue

| | Conf1 Casino | Conf1 Netzer | Conf1 Tes | Conf2 Casino | Conf2 Netzer | Conf2 Tesch | P1A Casino | P1A Netzer | P1A Tesch | P1B Casino | P1B Netzer | P1B Tesch | P2 Casino | P2 Netzer | P2 Tesch | P3 Casino | P3 Netzer | P3 Tesch | P4 Casino | P4 Netzer |
|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Conf1 Netzer | 4.50E-09 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Conf1 Tesch | 2.00E-14 | 0.39253 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Conf2 Casino | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Conf2 Netzer | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 0.04543 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Conf2 Tesch | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 2.70E-11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P1A Casino | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P1A Netzer | 1.40E-11 | 0.0005 | 0.00146 | 1.20E-09 | 7.40E-11 | < 2E-16 | < 2E-16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P1A Tesch | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 0.05001 | < 2E-16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P1B Casino | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 8.70E-13 | < 2E-16 | 0.00458 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P1B Netzer | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 8.50E-07 | < 2E-16 | 0.55647 | 0.60728 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P1B Tesch | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 4.40E-08 | < 2E-16 | < 2E-16 | 5.00E-11 | 1.90E-09 | 9.30E-12 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P2 Casino | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P2 Netzer | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 0.72275 | - | - | - | - | - | - | - |
| P2 Tesch | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 0.55647 | 0.72275 | - | - | - | - | - | - |
| P3 Casino | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 3.70E-11 | < 2E-16 | 5.00E-10 | 1.10E-11 | 7.90E-06 | 5.80E-07 | 0.72275 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | - | - | - | - | - |
| P3 Netzer | < 2E-16 | 1.50E-13 | 1.70E-09 | 0.00029 | 0.09916 | 0.72275 | < 2E-16 | 0.0486 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 2.80E-06 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 0.00022 | - | - | - | - |
| P3 Tesch | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 1.10E-13 | 2.80E-13 | 9.20E-15 | 1.60E-05 | 0.00186 | 0.00224 | 0.55647 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 0.40712 | 6.20E-09 | - | - | - |
| P4 Casino | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | - | - |
| P4 Netzer | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | - |
| P4 Tesch | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | < 2E-16 | 1.40E-09 | < 2E-16 |