

Article de synthèse publié à l'issue d'une présentation orale lors de la table ronde organisée le 12 mai 2022 à Dijon

## Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation Network (QameleON-Dijon) : un réseau dense de mesures de la qualité de l'air à Dijon

Nadège Martiny <sup>1\*</sup>, Nicolas Marilleau <sup>2</sup>, Sarah Marion <sup>1</sup>, Julita Diallo-Dudek <sup>1</sup>, Lola Canovas <sup>1,3</sup>, Alexandre Bisquerra <sup>2</sup>, Mario Rega <sup>1</sup>, Thomas Thevenin <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Université de Bourgogne, France

<sup>2</sup> Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes COMplexes, UMI 209, IRD Bondy, France

<sup>3</sup> Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris, UMR 242, IRD Bondy, France

<sup>4</sup> Théoriser et Modéliser pour Aménager, UMR 6049, CNRS/Université de Bourgogne-Franche-Comté, France

\* Auteure de correspondance : [nadege.martiny@u-bourgogne.fr](mailto:nadege.martiny@u-bourgogne.fr)

### Contexte

QameleON-Dijon (*Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation Network in Dijon*) a été déployé dans le cadre du programme POPSU (*Plateforme d'Observation des Projets et Stratégies Urbaines*) PURE (*Plateforme URbaine d'Expérimentation de Dijon*) financé par le Ministère de Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires et Dijon Métropole et coordonnée par Dijon Métropole et le laboratoire de recherches THÉMA (*Théoriser et Modéliser pour Aménager*) de l'Université de Bourgogne Franche-Comté. L'objectif de ce programme d'une durée de trois ans (2019-2021) était de créer un observatoire environnemental s'inscrivant dans la mouvance 'Smart City', conçu pour mesurer les ambiances thermiques et la qualité de l'air, dans le but d'évaluer l'apport de la ville intelligente pour la fabrique d'un urbanisme durable (Cahier POPSU, 2023). Le volet qualité de l'air du programme a été piloté par le CRC (*Centre de Recherches de Climatologie*) au laboratoire Biogéosciences de l'Université de Bourgogne.

Le premier objectif était de concevoir puis déployer un réseau dense de qualité de l'air en environnement urbain réel sur la base d'une toute

nouvelle micro-station de mesures sous Licence open source depuis 2020. Le second objectif était de créer un cadre de 'calibration-validation' inédit, en partenariat avec l'AASQA (*Association Agréée de Surveillance de Qualité de l'Air*) ATMO-BFC (*Bourgogne Franche-Comté*), sur des sites aux typologies urbaines diversifiées dans le but d'illustrer la très haute variabilité spatio-temporelle de la pollution particulaire. Le troisième objectif était de tester la fiabilité et le potentiel des premières mesures du réseau dans un contexte sanitaire inédit, la pandémie de Covid-19.

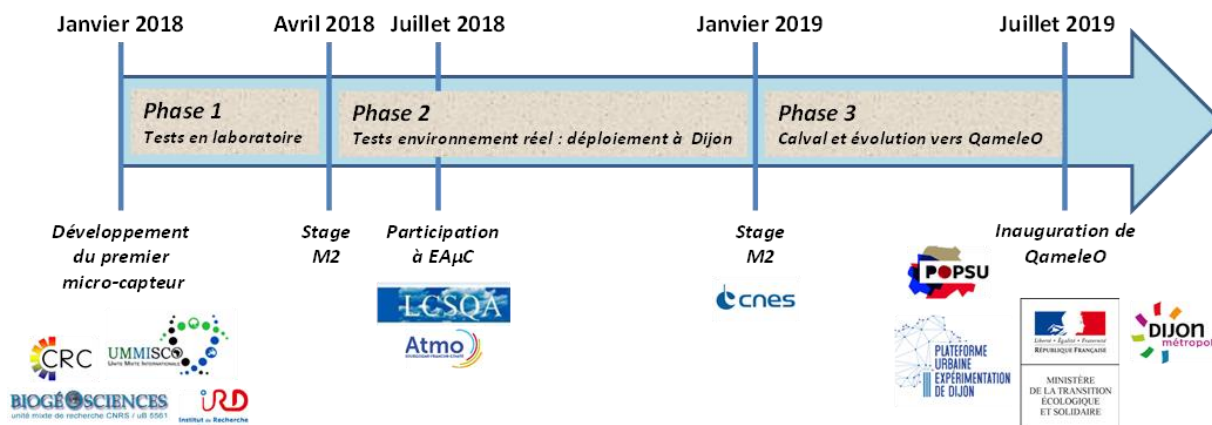
### 1. La genèse du réseau

L'idée de déployer un réseau dense de qualité de l'air à Dijon est venue suite au développement du concept QameleO (*Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation*), fondé sur des cellules de mesures 'low-cost' et s'inscrivant pleinement dans une période d'émergence et d'engouement pour la technologie des micro-capteurs (Borrego *et al.*, 2016). Il s'agit de pouvoir l'implanter en nombre à Dijon et ainsi répondre au besoin de densité spatiale de l'information en qualité de l'air.

## 1.1. QameleO, un concept innovant (2018-2019)

En 2018 et 2019, le laboratoire Biogéosciences a développé, en partenariat avec l'UMMISCO (*Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes*) de Bondy, la micro-station de

mesures environnementales QameleO permettant de mesurer les concentrations en matières particulaires de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) et 1  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_1$ ). Ce développement s'est déroulé en trois phases (figure 1).



**Figure 1.** Les trois phases de développement de la micro-station de mesures QameleO (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation) de janvier 2018 à juillet 2019. *The three development phases of the QameleO (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation) micro-station from January 2018 to July 2019.*

Durant la phase 1, de janvier à avril 2018, un premier prototype (figures 2a et 2b) a été mis au point après une série de tests en laboratoire. Durant la phase 2, d'avril 2018 à janvier 2019, trois autres micro-capteurs connectés par GSM (*Global System for Mobile*) ont été montés et implantés en environnement réel. Les mesures acquises au pas de

temps de la minute sur quatre stations de mesures d'ATMO-BFC à Dijon et Nuits-Saint-Georges ont permis de tester les micro-capteurs dans des conditions atmosphériques diversifiées, avec en été des températures élevées et des orages, en automne la pluie et le brouillard et en hiver, le froid et les épisodes neigeux (Jouandanne, 2018).

**Figure 2.** Le prototype de QameleO (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation), développé par l'Université de Bourgogne et l'Institut de Recherches pour le Développement, installé sur le toit de la station de référence des Péjoces d'ATMO Bourgogne-Franche-Comté en 2018 (a, cercle noir). En 2019, le prototype (b, dimensions 16 x 17 x 8 cm) devient la micro-station de mesures QameleO (c, dimensions 30 x 17 x 8 cm).

*The QameleO (Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation) prototype, developed by Université de Bourgogne and Institut de Recherche pour le Développement, settled on the roof of the ATMO Bourgogne Franche-Comté reference station of Péjoces in 2018 (a, black circle). In 2019, the prototype (b, dimensions 16x17x8 cm) becomes the QameleO micro-station (c, dimensions 30x17x8 cm).*



En parallèle, un des micro-capteurs a pu participer à une campagne d'évaluation pour la surveillance de la qualité de l'air, conduite par l'INERIS (*Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*) et l'IMT (*Institut Mines Télécom*) Lille Douai en tant que membres du LCSQA (*Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air*). Cette inter-comparaison de micro-capteurs en site fixe à l'échelle nationale (Crunaire *et al.*, 2018) a permis d'établir que le prototype développé était léger et facile à mettre en œuvre et qu'il permettait de reproduire la dynamique temporelle des concentrations en particules fines. La corrélation trouvée avec les mesures de référence pour les PM<sub>2.5</sub> est satisfaisante avec un score de 0,73. L'écart moyen est de -2,71 µg/m<sup>3</sup>. Les points limitants du système, qui n'était à ce stade pas encore conçu pour une utilisation prolongée en air extérieur, relevaient en outre de détails pratiques : manque de système de fixation sur un support vertical, manque d'alimentation autonome, difficulté de récupération des données. En 2019, la phase 3 du développement a consisté à mener des essais métrologiques en laboratoire afin de faire évoluer la première version des micro-capteurs vers une solution qui réponde aux besoins scientifiques. En juin 2019, la première version de QameleO est achevée (figure 2c), offrant une mesure fiable de la pollution aux particules fines.

Depuis 2020, QameleO, qui est une copropriété de l'Université de Bourgogne et de l'Institut de Recherche pour le Développement, est sous licence open source Creative Commons BY NC ND pour la partie tutoriels et CERN OHL W pour la partie logiciel, dans un but de formation et de partage du concept développé.

## 1.2. Sélection des sites d'implantation (2019-2020)

A Dijon, la première micro-station QameleO a été inaugurée le 5 juillet 2019 sur le site du Port du Canal (fond urbain) en présence d'élus et de chercheurs dans le cadre de l'événement 'Regards croisés' du programme POPSU PURE. Un travail de sélection d'autres sites d'implantation a ensuite été engagé. Pour ce faire, il a d'abord fallu dimensionner le réseau, les micro-stations de mesures devant être réparties sur une superficie totale d'environ 100 km<sup>2</sup>. Dans un premier temps, implanter 20

QameleO semblait suffisant pour documenter la variabilité de la pollution particulaire à l'échelle d'un quartier : ceci représente en effet 1 micro-station par parcelle de 5 km<sup>2</sup>.

Le déploiement en réseau se déroula ensuite en quatre étapes. L'étape 1 a visé à créer un indice d'implantation sur lequel se fonde un premier choix de sites dits théoriques : ce travail est assuré par l'Université. L'étape 2 a consisté à sélectionner parmi ces sites ceux dont les conditions pratiques permettent une implantation, notamment l'état des candélabres sur lesquels les micro-stations sont fixées : ce travail est le fruit d'une collaboration entre l'Université et la collectivité. L'étape 3 a été une étape de préparation technique des supports par le service 'éclairage public' de la collectivité. L'étape 4 a visé à l'implantation sur site et à la mise en route des micro-stations connectées : ce travail est assuré par l'Université en partenariat avec l'Institut de Recherches pour le Développement ayant développé et testé les micro-stations en amont. L'ensemble de ces étapes peut prendre 1 à 6 mois si le partenariat avec la collectivité est déjà bien établi.

L'indice d'implantation (étape 1) est très important car il constitue le point de départ de la définition du réseau de mesures dense de micro-stations dans une ville. Il repose sur une série de données spatialisées et cinq critères : 1) le trafic, source principale de pollution de proximité en ville (Emery *et al.*, 2020) ; 2) d'autres sources de pollution potentielle telles que les secteurs résidentiel, industriel ou encore l'influence des activités agricoles ; 3) la densité de population (choix d'une exposition maximale à la pollution) ; 4) le relief et la topographie urbaine (choix si possible de sites à une même altitude) ; 5) la morphologie urbaine (favorisant l'accumulation ou la dispersion des polluants à l'échelle du quartier et de la rue), avec la prise en compte de la largeur des voies de circulation, des bâtiments (emprise au sol et hauteur) et de la présence ou non de la végétation (hauteur, densité et type).

L'objectif est d'obtenir une grille d'indices d'implantation à l'échelle de la ville, combinant l'ensemble des critères mentionnés ci-dessus et variant entre 0 (aucun critère n'est respecté) et 5 (tous les critères le sont). Lorsque l'indice est élevé,

le ou les pixels sont sélectionnés. Il reste alors à choisir, au sein de ces pixels, les points-candélabres les plus propices à une implantation. Pour ce faire, deux éléments supplémentaires sont mobilisés, par des buffers calculés à partir du fichier de forme des candélabres fourni par la collectivité : l'indice d'ouverture 3D du site, ou 'Sky View Factor' (Oke, 1981), ainsi que l'éloignement suffisant (quelques dizaines de mètres) aux arrêts de bus et parkings.

A Dijon, le programme POPSU PURE a été une réelle opportunité d'imaginer déployer, en grandeur nature, un réseau de mesures dense de micro-stations de qualité de l'air. Le réseau QameleON-Dijon tel que prévu en 2020 à l'issue de l'étude d'implantation était constitué de 20 points-candélabres (figure 3).



**Figure 3.** Le réseau des micro-stations de mesures QameleO (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation) à Dijon, dit 'QameleON-Dijon', en juillet 2020. *The QameleON-Dijon (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation Network in Dijon) in July 2020.*

### 1.3. Déploiement en réseau de mesures (2020-2023)

L'idée est d'implanter les micro-stations de mesures à la manière d'un réseau de référence. Toutes les micro-stations sont implantées à 3 mètres de hauteur et avec une même exposition solaire. Le réseau dijonnais a ainsi été déployé en quatre phases correspondant à des années civiles.

La phase 1, en 2020, a été entrecoupée (contexte Covid-19). Elle s'est déroulée de janvier à mars puis de mai à octobre. Durant cette phase, 6 QameleO ont été implantés en plus de celui du 'Port du Canal' : les sites 'Hugo', 'Joffre', 'Pompon', 'Transvaal',

'Verdun' et 'Hoche/Raines'. En parallèle, et notamment pendant les confinements sanitaires, de nouvelles cellules de mesures des concentrations de PM ont été testées au sein de la micro-station QameleO. En effet, si les résultats préliminaires obtenus dans le cadre de la campagne d'évaluation de micro-capteurs fixes pour la surveillance de la qualité de l'air à l'échelle nationale (Crunaire *et al.*, 2018) étaient satisfaisants pour les PM<sub>2.5</sub> (§1.1), les mesures des concentrations en PM<sub>10</sub> semblaient moins performantes. Des approches de correction des concentrations en PM<sub>10</sub> ont alors été développées, fondées sur l'utilisation de mesures de référence et de variables météorologiques (Canovas,

2019) auxquelles les cellules de mesures ‘low-cost’ sont habituellement sensibles telles que l’humidité notamment (Crilley *et al.*, 2018). Après correction, les biais trouvés pour les PM<sub>10</sub>, bien qu’améliorés, restaient tout de même plus élevés que dans le cas des PM<sub>2,5</sub>, en particulier pour les sites de proximité de trafic : +7,26 µg/m<sup>3</sup> en moyenne. Par ailleurs, si les pentes étaient relativement proches de 1, les coefficients de détermination restaient inférieurs à 0,75. Ainsi, les corrections apportées pour les PM<sub>10</sub> restaient insuffisantes pour satisfaire les métriques récemment établies (Karagulian *et al.*, 2019). Une série d’expériences a permis de montrer que les cellules de mesures de type Next-PM, développée par TERA Sensor, un peu plus onéreuses (une centaine d’euros) que les Plantower PMS-700 utilisées dans la première version de QameleO, offraient aussi une plus grande précision pour l’ensemble des fractions granulométriques mesurées. Se pose alors la question du maintien d’une correction pour les mesures des concentrations en PM<sub>10</sub> dans la nouvelle version des QameleO, d’autant qu’un contrôle qualité automatique des données est désormais établi (§2.1).

Durant la phase 2, en 2021, les QameleO déjà implantés ont subi une jouvence avec l’intégration des cellules de mesures Next-PM. Les QameleO des sites ‘Hoche’ et ‘Port du Canal’ sont actualisés, puis les sites de ‘Janin’ et ‘Carnot’ viennent s’ajouter au réseau. Les quatre sites, représentatifs de conditions de trafic (‘Hoche’ et ‘Carnot’) et de conditions de fond (‘Port du Canal’ et ‘Janin’) sont considérés comme des sites-pilotes pour QameleON-Dijon. Cette phase 2 du déploiement du réseau est également l’opportunité de tester la durabilité des batteries et des autres composants des micro-stations ainsi que la bonne connexion au réseau GSM et la transmission des données en temps réel.

La phase 3, en 2022, a permis la maintenance des micro-stations en marche, l’actualisation de quatre anciens sites : ‘Hugo’, ‘Joffre’, ‘Pompon’, ‘Verdun’ puis ‘Transvaal’, sur le site de référence d’ATMO-BFC. Le développement d’une interface de visualisation et de téléchargement des mesures QameleO (pour l’instant encore fermée au public) a été réalisé par l’Institut de Recherches pour le Développement.

La phase 4, en 2023, vise à l’implantation de

QameleO sur quatre nouveaux points-candélabres, préparés de longue date par la collectivité : ‘Kennedy’, ‘Georget’, ‘Mauris’ et ‘Lac Kir’. Cette phase sera aussi l’opportunité d’implanter cinq nouvelles micro-stations emblématiques, dont la localisation exacte est ouverte à la discussion avec la collectivité : ‘Dijon Métropole’ (site de la collectivité engagée dans le projet), ‘Grangier’ (site de l’hyper-centre dijonnais), ‘Colombière’ (le ‘poumon vert’ de la ville), ‘Chenôve’ et ‘Quetigny’ (sites de type ZAC), ‘Tanneries’ (écoquartier en devenir).

A ce jour, 9 QameleO ont été implantés et six points-candélabres ont été préparés à l’accueil d’un QameleO. Les implantations sont normées, avec des micro-stations de mesures calibrées et validées de manière homogène. Ceci ouvre le champ de la recherche scientifique en qualité de l’air par le biais de l’accès à des mesures de qualité scientifique et à plus haute densité spatiale que l’existant.

Avec ce réseau, d’ici à fin 2023, Dijon sera l’une des premières villes françaises dotée de 20 micro-stations de mesures connectées dans le domaine de la qualité de l’air, avec une transmission en temps réel des données (actualisée toutes les 3 heures), s’inscrivant dans une démarche d’observatoire (acquisition de données sur plusieurs années et en de nombreux points fixes répartis dans la ville) tout en répondant aux enjeux d’une ‘Smart City’.

## 2. Résultats préliminaires

### 2.1. Contrôle qualité des mesures des QameleO

Les cellules de mesures des concentrations en PM ont été remplacées à partir de la phase 2 du déploiement du réseau QameleON-Dijon (§1.3). Les quatre sites-pilotes représentatifs de conditions de trafic (‘Hoche’ et ‘Carnot’) et de conditions de fond (‘Port du Canal’ et ‘Janin’) en sont donc équipées. Une étude sur une période supérieure à un an, du 1<sup>er</sup> novembre 2020 au 31 décembre 2021, a alors été engagée afin d’évaluer la qualité des données recueillies sur ces quatre lieux dijonnais représentatifs. Ce contrôle qualité dispose de deux niveaux notés L0 (niveau 0) et L1 (niveau 1).

Tout d’abord, au niveau 0, une méthode de détection automatique des NaN (*Not a Number*) a

été appliquée aux 12 séries de données (3 polluants et 4 sites). Partant du principe que si une mesure est manquante pour une fraction granulométrique, elle l'est aussi pour les 2 autres, seuls les résultats pour les  $PM_{2.5}$  sont reportés. Ainsi, on trouve en moyenne 5,6 % de valeurs manquantes dans une série de mesures d'un polluant pendant un an, ce qui est acceptable. Ces valeurs sont généralement non consécutives. Les QameleO semblent ainsi offrir des mesures continues sur de longues périodes.

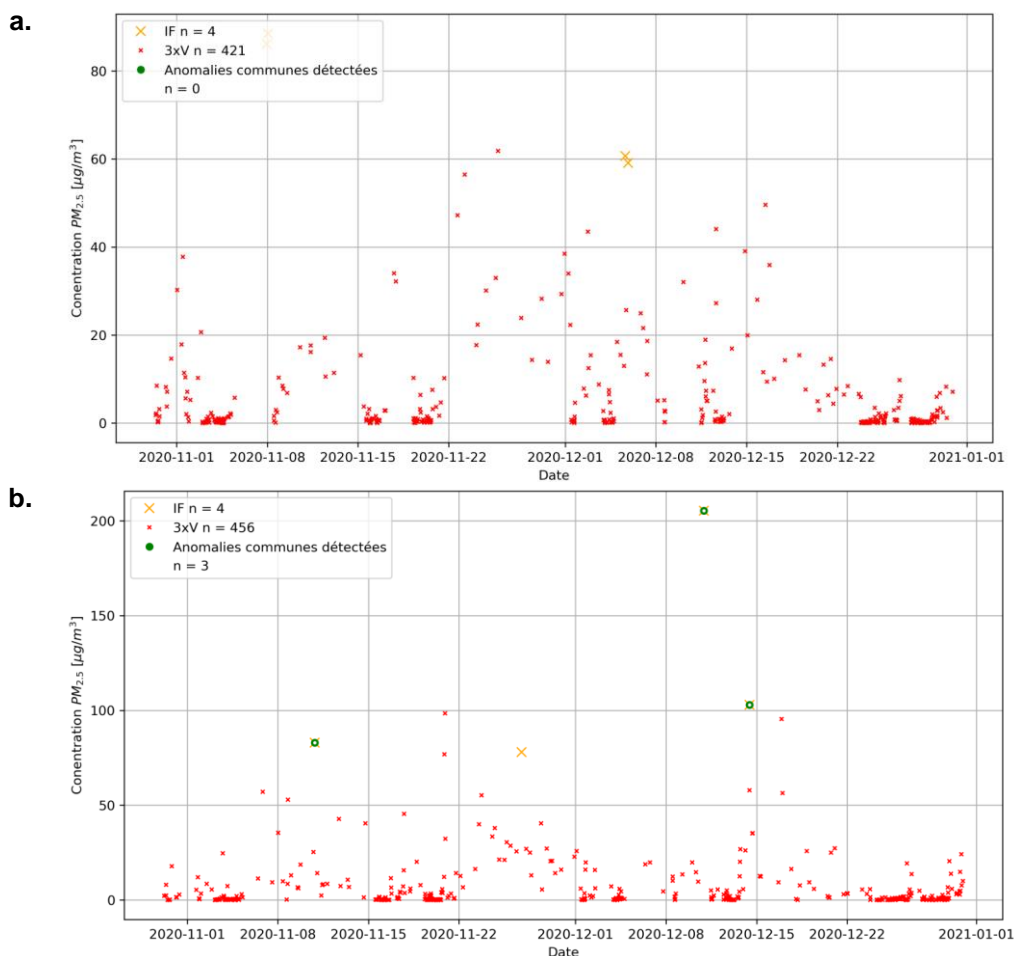
Au niveau 1, une première méthode de détection des valeurs aberrantes dans les mesures des concentrations est appliquée. Cette méthode consiste, tout comme les AASQA le font pour les mesures de référence, à comparer une mesure acquise à un instant  $t$  à la mesure précédente

(acquise à  $t-1$ ) ainsi qu'à la mesure suivante (acquise à  $t+1$ ). Ainsi, si :

$$\begin{cases} [PM](t) < 3x [PM](t-1) \\ [PM](t) > 3x [PM](t+1) \end{cases}$$

alors  $[PM](t)$  est supprimée de la série.

Cette méthode est nommée '3xV' (3 time Values). Elle supprime des centaines de valeurs. Par exemple, sur les sites trafic de 'Carnot' et de 'Hoche', 421 et 456 valeurs sont considérées comme aberrantes pour les  $PM_{2.5}$  (figure 4, croix rouges). Ces valeurs sont majoritairement à des niveaux de concentrations inférieures à  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ce qui correspond au nouveau seuil de l'OMS (*Organisation Mondiale de la Santé*) à ne pas dépasser sur 24 h depuis 2021.



**Figure 4.** Contrôle qualité des mesures de concentrations massiques en  $PM_{2.5}$  (matière particulaire de diamètre inférieur à 2.5 micromètres) des micro-stations de mesures QameleO : comparaison entre deux méthodes de détection des anomalies sur 2 deux sites trafic : a) 'Carnot' ; b) 'Hoche'. L'acronyme 'IF' correspond à la méthode 'Isolation Forest'. L'acronyme '3xV' correspond à la méthode classique des '3 time Values'. *Quality check of the  $PM_{2.5}$  (Particulate Matter of diameter below 10 micrometers) mass concentration measurements from the QameleO: comparison between two methods of anomaly detection over two traffic sites: a) 'Carnot' ; b) 'Hoche'. The 'IF' acronym corresponds to the 'Isolation Forest' method. The '3xV' acronym stands for the '3 time Values' classic method.*

Une deuxième méthode de détection des anomalies a également été testée sur les mêmes séries de mesures. Cette méthode dite 'IF' (*Isolation Forest*) est non supervisée. Contrairement aux autres méthodes connues, elle ne se fonde pas sur une approche de distribution statistique ou une définition d'un seuil de détection des valeurs aberrantes mais sur l'isolement des valeurs aberrantes à l'aide d'un ensemble d'arbres de décisions (Liu *et al.*, 2008). La méthode 'IF' détecte seulement quatre valeurs aberrantes pour chacun des sites 'Carnot' et 'Hoche' (figure 4, croix oranges). Ces valeurs sont, dans chaque cas, élevées, c'est-à-dire supérieures à  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ce qui correspond au seuil de l'OMS à ne pas dépasser sur 24 h pour la fraction granulométrique la plus grossière, *i.e.* les  $\text{PM}_{10}$ . Dans le cas de 'Carnot', 100 % des anomalies isolées avec la méthode 'IF' ne sont pas communes avec les anomalies détectées via la méthode '3xV'. Dans le cas de 'Hoche', trois anomalies détectées sont communes. Les méthodes '3xV' et 'IF' donnent donc des résultats très différents. La méthode 'IF' semble détecter moins de valeurs aberrantes, ces dernières étant à des niveaux de concentrations au-delà des nouveaux seuils recommandés par l'OMS. Ainsi, la méthode 'IF' semble pertinente car elle permet de repérer les valeurs aberrantes sans pour autant supprimer les pics de pollution. C'est donc cette méthode de nettoyage des données qui sera conservée pour la suite.

## 2.2. Impact du Covid-19 sur les concentrations en $\text{PM}_{10}$ à Dijon

Les confinements de 2020 en lien avec la pandémie de Covid-19 ont eu un impact sans précédent sur la qualité de l'air à l'échelle mondiale (Venter *et al.*, 2021). Les auteurs mettent notamment en évidence une nette amélioration des niveaux de pollution en se basant sur l'utilisation de produits satellitaires et des mesures de terrain issues de plus de 10 000 stations de qualité de l'air dans 34 pays. Les concentrations en dioxydes d'azote ont chuté de 60 % en lien avec la diminution drastique du trafic routier. L'impact sur les concentrations en particules fines est également notable, puisque, par exemple, les concentrations en  $\text{PM}_{2.5}$  subissent un déclin de l'ordre de 31 %. Cependant, il est moins facile à mettre en évidence que dans le cas des

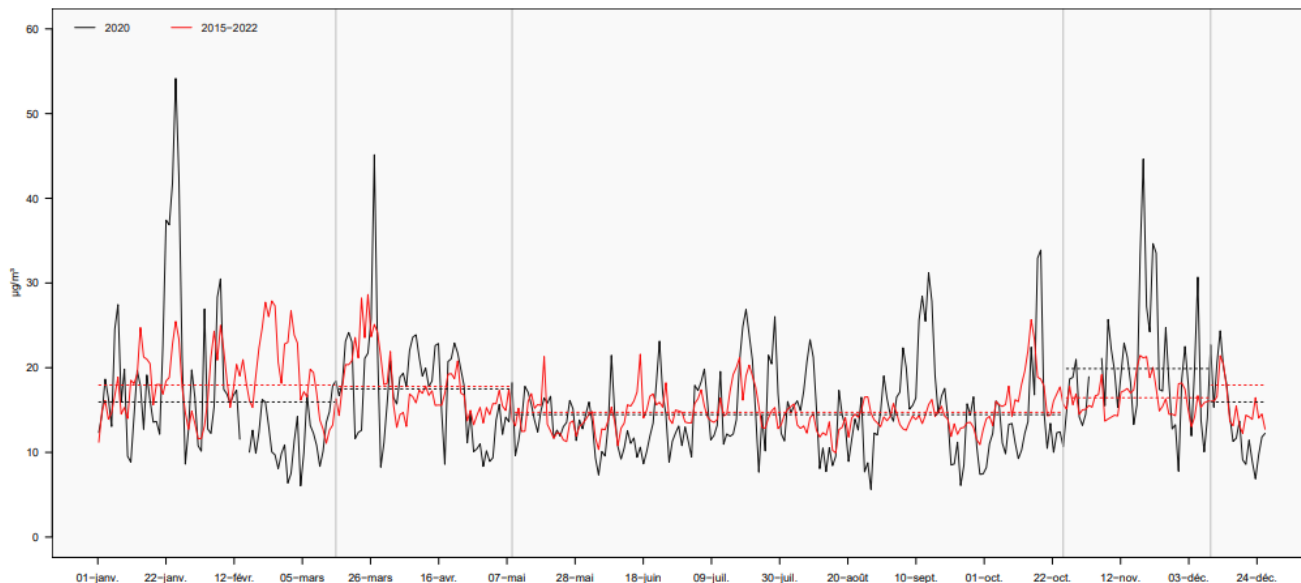
oxydes d'azote de par la diversité des sources potentielles : trafic, secteur résidentiel, industriel ou encore agricole. Dépendant du tissu urbain et de l'environnement de la ville, l'effet du confinement sur la pollution particulaire peut donc être variable d'un espace urbain à un autre.

Qu'en est-il dans une ville comme Dijon ? La concentration moyenne annuelle en  $\text{PM}_{10}$  sur une période de 8 ans (2015-2022) et sur un site de fond urbain (station des Péjoces d'ATMO-BFC) est de  $16,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ce qui est  $\sim 60$  % plus faible que le seuil fixé par l'Union Européenne à l'heure actuelle ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mais se situe légèrement au-delà du seuil recommandé par l'OMS depuis 2021 ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les concentrations en  $\text{PM}_{10}$  ont un cycle saisonnier relativement marqué à Dijon, avec des niveaux plus élevés en hiver ( $17,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) qu'en été ( $14,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les confinements de 2020 se situent au printemps et en automne, durant des périodes de pollution dite intermédiaires.

La figure 5 représente le cycle saisonnier moyen des concentrations en  $\text{PM}_{10}$  sur la station des Péjoces en comparaison de l'année 2020 durant laquelle deux confinements ont été mis en place, de mars à mai avec des déplacements domicile-travail très restreints (confinement 1), puis d'octobre à décembre avec des contraintes de déplacements un peu plus souples (confinement 2). Cette figure indique que la concentration moyenne en  $\text{PM}_{10}$  durant le confinement 1 ( $17,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est très proche de la moyenne 2015-2022 ( $17,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Aucun effet d'amélioration de la pollution aux particules fines ne semble notable pendant le confinement 1. En effet, si le trafic a considérablement diminué, et ainsi la pollution de fond à Dijon, la pollution aux  $\text{PM}_{10}$  reste élevée à cette période printanière, en lien avec des activités de type agricole. Pendant le confinement 2, la moyenne des concentrations en  $\text{PM}_{10}$  est de  $19,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alors que la moyenne 2015-2022 est de  $16,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cet écart de  $+3,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre 2020 et la moyenne 'long-terme' est supérieur à l'écart-type des concentrations en  $\text{PM}_{10}$  sur la période correspondant au confinement 2, *i.e.*  $2,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce n'est pas le cas des autres périodes étudiées, pendant lesquelles l'écart entre 2020 et la moyenne 'long-terme' est toujours inférieur à l'écart-type des concentrations moyennes sur la période considérée.

Par exemple, de janvier à mars, lorsque les concentrations en  $PM_{10}$  sont les plus élevées, l'écart entre 2020 et la moyenne 2015-2022 est de  $-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alors que l'écart-type 2015-2022 des concentrations en  $PM_{10}$  sur la période janvier-mars est de  $4,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations en  $PM_{10}$  supérieures à la moyenne 'long-terme' pendant le confinement 2 de 2020 pourraient-elles être imputables aux modifications de

déplacements et d'habitudes ? La mise en place du télétravail et l'augmentation du chauffage résidentiel en cette période automnale aurait-il joué un rôle sur l'augmentation des émissions en particules fines puis des concentrations en  $PM_{10}$  mesurées ? Ceci est une hypothèse plausible. Cependant, elle reste à vérifier en étudiant les conditions météorologiques à cette période de l'année (Marion *et al.*, 2023).



**Figure 5.** Les concentrations massiques en  $PM_{10}$  (matière particulaire de diamètre inférieur à 10 micromètres) mesurées par la station de référence des Péjoces d'ATMO Bourgogne-Franche-Comté de janvier à décembre. Elles sont agrégées au pas de temps quotidien et exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La moyenne 2015-2022 est représentée en rouge, l'année 2020 en noir. La période de mars à mai 2020 (confinement 1) et la période d'octobre à décembre (confinement 2) sont matérialisées par des lignes verticales grises. Les niveaux rouge et noir représentent la valeur moyenne des concentrations massiques en  $PM_{10}$  pour chaque période étudiée : en rouge, pour la période 2015-2022, en noir, l'année 2020. *The daily  $PM_{10}$  mass concentration measurements (expressed in  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ) in the ATMO Bourgogne Franche-Comté reference site of Péjoces from January to December. The 2015-2022 mean is represented in red. The year 2020 is represented in black. The March to May 2020 (lockdown 1) and the October to December 2020 (lockdown 2) periods are materialized by gray vertical lines. The red and black levels illustrate the average of the  $PM_{10}$  mass concentrations for each study period: in red, for the 2015-2022 period, in black for the year 2020.*

La concentration moyenne en  $PM_{10}$  mesurée par la micro-station QameleO pendant le confinement 2 dans le secteur des Péjoces est de  $19,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ce qui est une valeur très proche de celle enregistrée par l'analyseur de référence d'ATMO-BFC ( $19,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Par ailleurs le coefficient de corrélation simple entre les mesures QameleO et l'analyseur de référence à Péjoces est de  $+0,79$  ( $p=0,01$ ). Ces résultats sont à souligner car ils indiquent que les QameleO trouvent des résultats en cohérence avec les analyseurs de référence, en particulier pour les  $PM_{10}$  qui posaient question avant l'intégration d'une nouvelle cellule de mesures dans la micro-station. Ceci donne confiance en la donnée et vient

conforter l'utilisation des mesures des micro-stations à des visées scientifiques.

## Conclusion

Le programme POPSU PURE (2019-2022), coordonné par Dijon Métropole et le laboratoire de recherches THÉMA de l'Université de Bourgogne Franche-Comté, a été un véritable incubateur scientifique permettant de conceptualiser puis de déployer un réseau dense de qualité de l'air fondé sur la technologie des micro-capteurs en environnement urbain réel (Martiny, 2021). Dans ce programme, notre démarche s'est appuyée sur la toute nouvelle

micro-station de mesures, QameleO, copropriété de l'Université de Bourgogne et de l'Institut de Recherches pour le Développement, sous Licence open source depuis 2020. Nous avons pu démontrer la fiabilité des mesures fournies par le réseau grâce à trois ans d'expérimentation et d'approches de calibration-validation sur des sites urbains aux typologies diversifiées, et grâce à un partenariat solide avec l'AASQA régionale ATMO-BFC et Dijon Métropole. Les données sont maintenant contrôlées et utilisables à des fins scientifiques et thématiques : une étude spécifique dédiée à l'impact des confinements sanitaires de 2020 sur la pollution aux particules fines a permis de dégager des résultats préliminaires encourageants (Marion & Martiny, 2023).

QameleON-Dijon a permis d'ouvrir des perspectives scientifiques à trois échelles :

- **Régionale** en partenariat avec ATMO-BFC via une étude comparative entre deux villes au gradient de pollution marqué, Monbéliard et Dijon (Marion, 2022) ;
- **Européenne** avec le programme européen H2020 RESPONSE (*integRatEd Solutions for PPositive eNergy and reSilient citiEs*) (2022-2025) visant à montrer l'apport d'un réseau dense de mesures dans les simulations à Très Haute Résolution Spatiale (pixel de 10 mètres de côté) des concentrations en particules fines (Dudek *et al.*, en préparation) ;
- **Internationale** avec le projet ANR AIRQUALI\_4\_ASMAFRI (*AIR QuALity and quality of life for ASthMatic children in AFRica*) (2021-2025) dédié à l'analyse du lien entre la pollution particulaire et l'asthme chez les jeunes enfants à Cotonou au Bénin.

QameleON-Dijon a aussi permis une ouverture vers le monde socio-économique. Le projet ANR LabCom (*Laboratoire Commun*) WAQATALI (*Water and Air QuALity monitoring for Smart vegeTAL Infrastructures in cities*) (2023-2028), fruit d'un partenariat public/privé entre l'Institut de Recherches pour le Développement et la société UrbaSense, et auquel l'Université de Bourgogne participe, porte par exemple sur la végétation en milieu urbain et son rôle à micro-échelles, notamment son impact sur la qualité de l'air.

L'ensemble de ces projets permettra de mieux comprendre la qualité de l'air en ville, ses variations spatio-temporelles, et notamment à fine échelle, ainsi que ses impacts sur la santé humaine. Ces projets constitueront également des clés pour mieux aménager en intégrant la végétation comme un objet d'infrastructure urbaine à part entière. Qu'il s'agisse de mieux caractériser et comprendre la qualité de l'air ou aménager l'espace urbain, il apparaît essentiel de construire des partenariats solides avec les agents et élus des collectivités concernées.

Enfin, notre démarche se veut complémentaire de celles s'inscrivant dans la mouvance de production de données de masse citoyennes (par exemple 'Strava' ou 'Open Street Map'). En effet, dans ces cas, l'utilisation des données produites par les utilisateurs s'avère compliquée, en lien avec un accès difficile aux données (droit utilisateur), à leur hétérogénéité, qualité et représentativité, périodes de mesures (souvent courte, ou lacunaire, irrégulière), ou encore au manque de calibration instrumentale. Le projet QameleO vise à proposer des tutoriels d'implantation normée des stations environnementales, des partenariats avec des lycées et un infléchissement vers les sciences participatives avec la mise en place, à terme, d'un QR (*Quick Response*) code au pied de chaque candélabre sur lequel sera fixé une micro-station de mesures. L'objectif est ainsi de s'orienter non pas vers le 'Big data' mais vers le 'Big and Smart data' à la fois scientifique et citoyen.

**Remerciements** : Nous remercions le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, financeur du programme POPSU PURE, cadre de concept et de développement du réseau QameleON-Dijon. Nous remercions Dijon Métropole pour la confiance accordée dans la réalisation de ce projet et l'aide technique apportée pour la préparation des candélabres accueillant les micro-stations de mesures. Nous remercions ATMO-BFC pour la mise à disposition des mesures des analyseurs de référence sans lesquelles les approches de calibration-validation des QameleO n'auraient pu être mises en œuvre. Nous remercions le FabLab (*Fabrication Laboratory*) in Bondy pour l'aide conséquente apportée dans la fabrication des QameleO pendant l'année 2022.

## Références

- Borrego C., Costa A. M., Ginja J., Amorim M., Coutinh M., Karatzas K., Sioumis T., Katsifarakis N., Konstantinidis K., De Vito S., Esposito E., Smith P., André N., Gérard P., Francis L. A., Castell N., Schneider P., Viana M., Minguillón M. C., Reimringer W., Otjes R. P., von Sicard O., Pohle R., Elen B., Suriano D., Pfister V., Prato M., Dipinto S., Penza M., 2016. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: the EUNetAir joint exercise. *Atmos. Env.*, 147, 246-263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>
- Crunaire S., Redon N., Spinelle L., 2018. *1<sup>er</sup> essai national d'Aptitude des micro-capteurs (EAμC) pour la surveillance de la qualité de l'air : synthèse des résultats*. Rapport LCSQA DRC\_18\_174307\_09689A.
- Cahier POPSU, 2022. *Observation environnementale métropolitaine : retour d'expérience sur l'observatoire dijonnais*. Par A. Jegou, N. Martiny, Y. Richard, T. Thévenin, Edition Autrement Flammarion, Paris, 2023.
- Canovas L., 2019. *Les microcapteurs de particules en suspension à Dijon : études de sensibilité aux variables météorologiques*. Mémoire de stage au CRC/Biogéosciences (Dijon), Master Sol Eau Milieux Environnement 2<sup>ème</sup> année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne, 74 pp.
- Crilly L. R., Shaw M., Pound R., Kramer L. J., Price R., Young S., Lewis A. C., Pope F. D., 2018. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmos. Meas. Tech.*, 709–720. <https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018>
- Dudek J., Martiny N., 2023. Contribution of a dense network of air quality measurements in Very High Spatial Resolution SIRAN simulations. *In prep. for Atmospheric Pollution*.
- Emery J., Marilleau N., Martiny N., Thevenin T., 2020. The SCAUP model: multi-agent simulation from Urban sensors for traffic air pollution. *Cybergeo: European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, 944, <https://journals.openedition.org/cybergeo/34767>
- Jouandanne L., 2018. *La qualité de l'air à Dijon vue par les microcapteurs de particules fines*. Mémoire de stage au CRC/Biogéosciences (Dijon), Master Transport Mobilités Environnement Climat 2<sup>ème</sup> année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne, 45 pp.
- Karagulian F., Barbieri M., Kotsev A., Spinelle L., Gerboles M., Lagler F., Borowiak A., 2019. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Liu L., 2008. BEST: Bayesian estimation of species trees under the coalescent model. *Bioinformatics*, 24(21), 2542-2543. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btn484>
- Marion S., 2021. *Analyse de la pollution particulaire à Dijon métropole durant les confinements d'octobre 2020 à mai 2021 : Apport des mesures du réseau QameleO*. Mémoire de stage, UMR Biogéosciences (Dijon), équipe Centre de Recherches de Climatologie. Master Sol Eau Milieux Environnement 1<sup>ère</sup> année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne, 41 pp.
- Marion S., 2022. *Caractérisation de la pollution particulaire en Bourgogne Franche-Comté, intégrant les PM1*. Mémoire de stage, UMR Biogéosciences (Dijon), équipe Centre de Recherches de Climatologie, Master Sol Eau Milieux Environnement 2<sup>ème</sup> année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne, 58 pp.
- Marion S., Martiny N., 2023. *Fine particle pollution in Bourgogne Franche-Comté during the Covid-19 period: analysis of the March-May and October-December 2020 lockdowns in Dijon and Montbéliard*. 36<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de la Climatologie, Bucarest, Roumanie, 3-7 juillet 2023, Poster et Actes.
- Martiny N., 2021. *Des aérosols désertiques en Afrique subsaharienne à la pollution particulaire en Zones urbaines : télédétection multi-échelles, variabilités spatio-temporelles, relations avec la santé humaine*. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, UMR Biogéosciences (Dijon), équipe Centre de Recherches de Climatologie, Discipline : Sciences de l'environnement, Université de Bourgogne, 214 pp, <https://biogeosciences.u-bourgogne.fr/francais/hdr/hdr-de-nadege-martiny.html>
- Venter Z. S., Aunan K., Chowdhury S., Lelieveld J., 2021. Air pollution declines during Covid-19 lockdowns mitigate the global health burden. *Environmental Research*, 192, 110403. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110403>
- Oke T. R., 1981. Canyon geometry and the nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1, 237-254. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370010304>

**Citation de l'article** : Martiny N., Marilleau N., Marion S., Diallo-Dudek J., Canovas L., Bisquerra A., Rega M., Thevenin T., 2023. Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation Network (QameleON-Dijon) : un réseau dense de mesures de la qualité de l'air à Dijon. *Climatologie*, 20, 4.