

# À propos des brouillards lyonnais : évolutions et qualité de l'air

## About Lyon's fog: trends and air quality

Florent Renard\*, Kenji Fujiki\*

### Résumé

Lyon a longtemps été connue pour ses brouillards. La fréquence de ces derniers est en baisse depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, pour diverses raisons. Ce phénomène est à considérer avec attention, à cause des risques pour le transport mais surtout pour la santé. En effet, le brouillard est synchronique d'une diminution de la qualité de l'air. Les concentrations en principaux polluants sont alors en nette augmentation avec la présence de brouillard, à l'exception de l'ozone dont la formation est ralentie par le blocage des rayons solaires. Ces augmentations de concentration se retrouvent à l'échelle horaire, et la qualité de l'air se dégrade régulièrement lors de la persistance des brouillards sur plusieurs jours consécutifs.

### Mots-clés

brouillard, pollution atmosphérique, santé, particules fines, ozone

### Abstract

Lyon has long been known for its fog. The frequency of these is declining since the early 20th century, due to several reasons. However, a resurgence of these can be observed, since the late 20th century. This is to be carefully considered, because of the risks for transport but especially for health. Indeed, the fog is synchronic to a decrease in air quality. The concentrations of main pollutants can significantly increase, with the exception of ozone whose formation is slowed down by blocking solar radiation. These increases in concentration are found at an hourly scale and air quality is particularly degraded during persistent fog on consecutive days.

### Keywords

fog, atmospheric pollution, health, particulate matter, ozone

---

(\*) Université Jean Moulin Lyon 3 – UMR 5600 Environnement Ville Société CNRS - 18, rue Chevreur – 69007 Lyon

## Introduction

Si, à l'échelle nationale, l'agglomération lyonnaise est aujourd'hui favorablement connue pour sa gastronomie, elle l'a aussi longtemps été d'une manière plus négative pour ses nombreux brouillards (figures 1 et 2). En effet, « *l'apparition fréquente de phénomènes de ce genre est de notoriété publique* » (Allix<sup>1</sup>, 1931), « *la mauvaise réputation du climat de Lyon est bien établie* » (Josserand, 1949) et « *avant la houille et les hautes cheminées industrielles il n'y avait pas de fumées et pourtant les brouillards étaient déjà légendaires* ». Dans un article publié par *L'Express* du 2 février 1898, M. Emmanuel Vingtrinier s'exprime ainsi « *Si nous parcourons les milliers de pages écrites sur Lyon dans tous les temps, nous y verrons revenir comme un refrain l'épithète de ville du brouillard* ». Et il ajoute : « *N'est-il pas curieux de voir, déjà sous l'Empire romain, les lettres du Midi cribler d'épigrammes nos Gallos-Romains de Lugdunum, pour leur pesanteur d'esprit et leur provincialisme, qu'ils attribuaient aux brouillards qui enveloppaient leur ville ?* » (Onofrio, 1913). Ces déclarations concordent avec celle de Sidoine Appolinaire<sup>2</sup> : « *Tu me félicites de mon séjour à Rome, mais toutefois d'un ton flatteur et railleur. Tu te réjouis, dis-tu, de ce que ton intime ami peut voir enfin le soleil à son aise, lui qui a joui si rarement de sa vue, tant qu'il n'a bu que les eaux de la Saône. Car tu me parles ironiquement du ciel nébuleux de mes Lyonnais, et tu te plains de ce que la chaleur du midi éclaircit à peine le jour voilé sous les brouillards du matin* » (dans LeLay, 2014).

De nombreux écrivains ont ainsi dépeint son ambiance obscure, terne et humide. Pour Stendhal « (...) *Lyon est le pays de la boue noire et des brouillards épais, cent fois plus que Paris* (...). *A Lyon, un brouillard épais règne deux fois la semaine pendant six mois : alors tout paraît noir ; on n'y voit pas à dix pas de soi* » (Stendhal, 1838). Pour Baudelaire, « *les choses ne se réfléchissent qu'à travers un milliers de vapeurs* » (dans Comby, 1997) et pour Taine, Lyon a un « *ciel toujours voilé* » (*ibid.*). Plus récemment, Jean Réverzy<sup>3</sup> a décrit Lyon comme « *un monde confus, peuplé de spectres familiers [...]. C'était le temps du brouillard : dès octobre il s'établissait sur la ville, comblant le vide des rues et des places, voilant les collines, amortissant les bruits, emprisonnant les êtres [...]. Grâce à lui, la nuit se prolongeait jusqu'au milieu du matin ; au début de l'après-midi seulement, l'univers vaporeux, pour une heure, s'éclairait : un rayon fugitif tombait sur les squares, où le bronze des sta-*

(1) André Allix (1889-1966) : géographe français, recteur de l'université de Lyon et directeur de la Revue de géographie de Lyon (actuellement *GéoCarrefour*).

(2) Sidoine Appolinaire (430-486) : né à Lyon, évêque d'Auvergne, préfet de Rome, écrivain gallo-romain.

(3) Jean Réverzy (1914-1959) : écrivain lyonnais, lauréat du Prix Renaudot.

*tues luisait de sueur froide, et sur les fleuves coulant vers d'invisibles horizons de lumière. Puis l'obscurité revenait : chacune de ces journées ressemblait à celle qui l'avait précédée. Monotonie noire ou clair-obscur que troublait parfois une éclaircie* » (Reverzy, 1954).

Ce brouillard lyonnais qui « *prive de l'action bienfaisante du soleil* » (Onofrio, 1913) est un « *phénomène très dangereux* » (Bergot et al., 2008) sur deux plans. Le premier est la visibilité, qui s'en trouve réduite, ce qui « *limite fortement la sécurité et la cadence du transport terrestre* » (Dupont, 2011). Il y avait, en moyenne à Lyon en 1913, une insolation directe de 2 heures par jour en novembre et février, 1 heure par jour en janvier et seulement 40 minutes en décembre (Onofrio, 1913) contre 1 heure trois-quarts aujourd'hui. « *En 1894-1900, le brouillard très dense rend la circulation en ville bien difficile* » (Limb, 1933) et cela conduit à des risques pour la circulation fluviale, aérienne et terrestre. Ainsi, cette visibilité réduite, avec parfois un plafond plus bas que les ponts et les quais, est à l'origine de plusieurs naufrages. Il conduit souvent à stopper le service des bateaux mouches de Perrache au pont de la Feuillée (Onofrio, 1913) et est « *pour la navigation aérienne un des dangers les plus redoutables* » (Favrot, 1932). Il mène à des accidents de la circulation, souvent mortels. En témoignent cet accident de voiture attelée qui plonge dans le Rhône avec monture et passagers le 14 décembre 1848<sup>4</sup>, ce bus perdu dans le brouillard qui tombe d'un quai du port Edouard-Herriot le 21 décembre 1976 et fait 14 victimes, ou encore cette collision en chaîne le 19 janvier 1982 sur l'A7 avec 5 morts et 53 blessés (Le Progrès, 2013).

Le second risque lié aux fréquents épisodes de brouillard lyonnais est son impact sur la santé, notamment sur les voies respiratoires. En effet, ils ont des « *impacts sur la chimie atmosphérique dans la couche de surface et donc sur la qualité de l'air* » (Dupont, 2011). Dès 1913, il est reconnu que « *le brouillard est un désagrément, et qu'il favorise le développement des maladies des voies respiratoires* » (Onofrio, 1913). La catastrophe dans la vallée de la Meuse en amont de Liège des 4 et 5 décembre 1930 et qui a provoqué « *plusieurs centaines de malades et une soixantaine de morts en deux jours* » (Allix, 1932) va susciter de nombreuses inquiétudes et études climatologiques et médicales sur le territoire lyonnais. Celles-ci ont pour objectifs d'« *associer les données de la météorologie à des analyses chimiques et bactériologiques, pour des fins d'urbanisme pratique* » (Allix, 1931), et A. Allix conclura la sienne par « *une catastrophe analogue à celle de Liège est donc théoriquement possible à Lyon* » (Allix, 1932). Cette catastrophe et ce risque potentiel qui « *prend à la*

(4) *Le censeur (journal lyonnais)*, édition du 15 décembre 1848.

gorge » (*ibid.*) vont mener à la constitution, en 1931, d'une commission de spécialistes pour l'étude des brouillards, à l'initiative du conseil municipal de Lyon (Allix, 1933, 1931 ; Frioux, 2013). Il peut être reconnu aux administrations de Lyon un rôle précurseur en la matière car « de nombreux auteurs s'accordent pour attribuer la naissance de la vigilance sanitaire sur la pollution moderne à la fameuse catastrophe londonienne de 1952, observée au cours d'un épisode de smog hivernal » (Roussel, 2015 - 3 500 à 4 000 morts dans le Grand Londres), événement postérieur à la création de la commission lyonnaise pour l'étude de l'atmosphère. Le Professeur Piéry de la faculté de médecine de Lyon publie en 1946 un ouvrage en quatre volumes consacré au « climat de Lyon », avec

notamment le dernier tome dédié aux « *maladies spécifiquement lyonnaises dues au froid et à l'humidité : rhumatismes, affections naso-pharyngées et pulmonaires* » (Josserand, 1949).

Cet article, dans un premier temps, s'intéresse aux brouillards lyonnais, à leurs conditions de formation et à leur évolution, afin de déterminer si, comme l'écrivait Alléon Duléac en 1756, il « *n'est peut-être point de climat en Europe où ils soient plus fréquents et plus épais qu'à Lyon* » (Alléon-Dulac, 1765). La deuxième partie de cet article étudie les relations entre la pollution atmosphérique contemporaine et les occurrences de brouillard, notamment les concentrations en particules fines, en oxydes d'azote et en ozone.

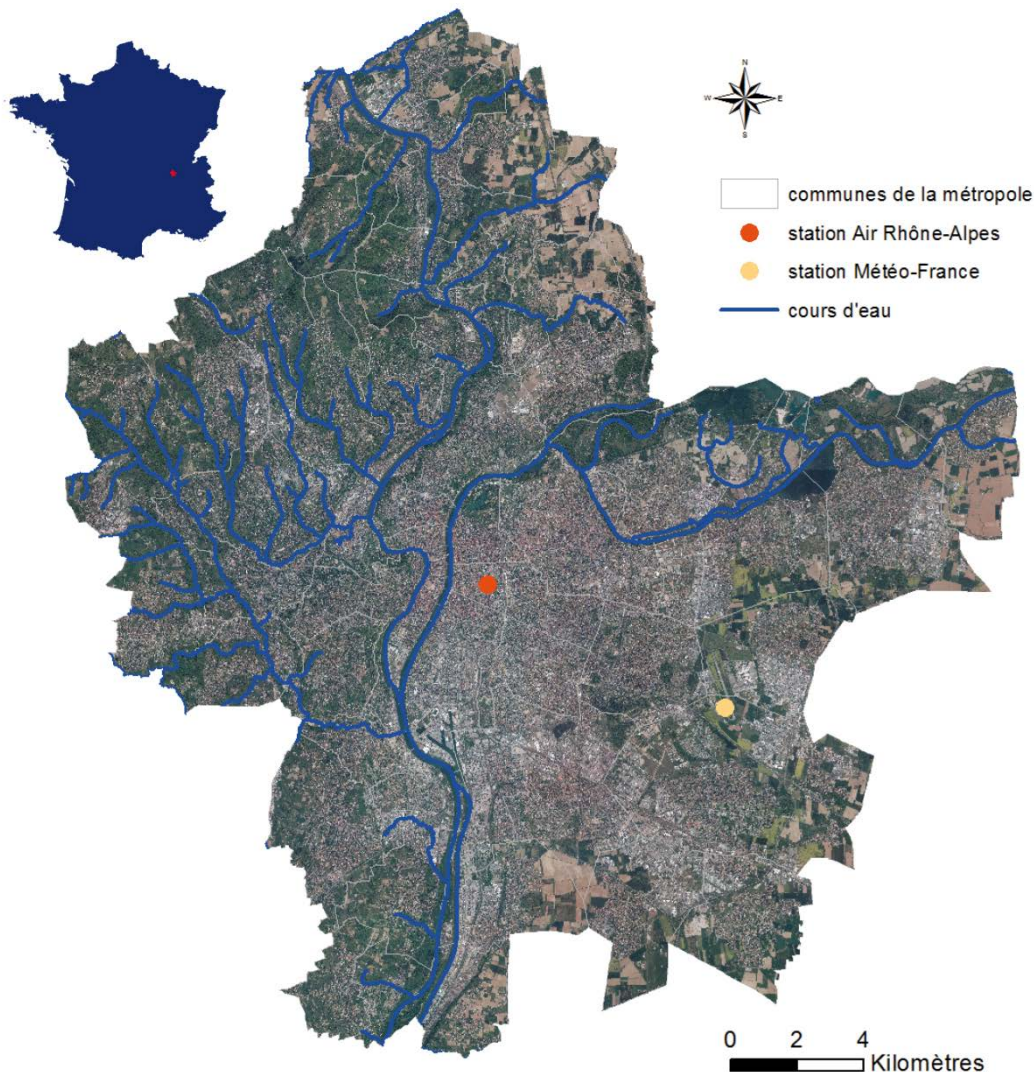


Figure 1. La métropole de Lyon : station météorologique de Lyon-Bron (Météo-France) et station de mesure de la qualité de l'air de Lyon-Centre (Air Rhône-Alpes)

**Figure 1. The metropolis of Lyon: meteorological station of Lyon-Bron (weather report-France) and measurement station of the air quality of Lyon-center**



Figure 2. Vue de la rive droite du Rhône et du pont de l'Université, par temps clair (en haut) et en présence de brouillard (16/12/2015) : la basilique Notre-Dame de Fourvière et la tour métallique de Fourvière en deviennent imperceptibles

*Figure 2. View of the right bank of the Rhône and the University Bridge, during clear weather (at the top) and in the presence of fog (16/12/2015): the basilica Notre-Dame of Fourvière and the metallic tower of Fourvière become imperceptible there*

## 1. Le brouillard Lyonnais : conditions de formation et tendances

### 1.1 Des conditions de formation diverses mais connues

Le brouillard est un type de condensation fait de gouttelettes en suspension ou de cristaux de glace, à un niveau très bas et limitant la visibilité horizontale à moins de 1 km. Au-delà, cette manifestation est appelée « brume » (Bergot et al., 2008 ; Sachweh et Koepke, 1997, 1995 ; Tardif et Rasmussen, 2007 ; Vigneau, 2005). Un brouillard très dense, tel que celui de Liège en 1930 (Allix, 1932) ou de Londres en 1952 (Roussel, 2015), est appelé smog puisqu'il combine la présence de gouttelettes d'eau avec celle des fumées. Le brouillard reste un phénomène qui est « *mal connu et mal prévu, malgré l'envolée des puissances de calcul numérique au cours des dernières années* » (Bergot et al., 2008) et « *nous sommes bien incapables d'en prévoir la durée et la localisation exactes* » (*ibid.*). Il répond à des conditions de formation essentielles :

- un air suffisamment humide pour que puisse se réaliser la saturation. « *A Lyon, la présence de deux grands cours d'eau [et de celle des étangs de la Dombes voisine], permettent un enrichissement diurne de l'air en vapeur d'eau par évaporation* » (Comby, 1997).

- des températures relativement fraîches pour que se forme la condensation. Il se forme ainsi en général de l'automne au printemps ou au cours du refroidissement nocturne.

- une atmosphère peu agitée, avec « *un brassage de l'air fort atténué, sinon, il ne subsisterait pas* » (Favrot, 1932) et « *fond dans une grande masse d'air comme le sucre dans l'eau* » (Onofrio, 1913). Les situations de « dorsale anticyclonique » (Bergot et al., 2008) sont donc très favorables à la formation de brouillard.

La réunion de ces conditions permet alors au brouillard de se former de différentes manières, dont la littérature se fait l'écho (voir par exemple Bergot et al., 2008 ; Sachweh et Koepke, 1995 ; Vautard et al., 2009 ; Vigneau, 2005). Il convient de remarquer que les conditions de formation du brouillard sont connues avec précision depuis longtemps. En effet, dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, Onofrio (1913), Allix (1931), Favrot (1932) ou encore Limb (1933) les énuméraient déjà avec précision et proposaient des moyens pour en éviter la formation :

- formation par rayonnement : refroidissement d'une masse d'air par rayonnement nocturne du sol ;
- formation par advection : refroidissement d'une masse d'air chaude et humide par déplacement sur une surface froide, généralement constituée d'eau ;
- formation par détente : refroidissement d'une masse d'air humide par soulèvement (baisse de pression) ;
- formation par mélange : refroidissement d'une masse d'air chaude par mélange avec une masse d'air plus froide (processus limité) ;
- formation par évaporation : enrichissement d'une masse d'air en vapeur d'eau, à proximité de cours d'eau ou de lac.

En outre, il est nécessaire que des noyaux de condensation soient présents dans la masse d'air pour que la condensation se produise. Ces conditions de formation sont connues de longue date, car G. Onofrio écrivait en 1913 que la fréquence du brouillard ne dépendait que du « *nombre de jours où la température s'est maintenue au-dessous de 7 à 8 °C* » et du « *nombre de jours où l'on constate un vent très faible et nul* ». De plus, les différentes sortes de brouillards [...] énumérées ci-dessus peuvent se présenter soit isolément, soit combinées les unes avec les autres.

Le maintien et la disparition du brouillard dépend de l'hygroscopicité, de la taille et de l'albédo des aérosols contenus dans l'atmosphère. En effet, plus les particules sont hydrophiles, plus le brouillard est constitué de nombreuses et petites gouttelettes, ce qui est le cas en milieu urbain. « *Plus ces gouttelettes sont grosses et se rapprochent des gouttes de pluie, plus le brouillard est sombre et plus il mouille, mais moins il est opaque. [...] Au contraire, plus les gouttes sont petites et serrées, plus le brouillard est dense et opaque* » (*ibid.*). En outre, plus les particules absorbent le rayonnement solaire (comme des suies), plus le brouillard se réchauffera et se dissipera rapidement (Bergot et al., 2008). De plus, « *ces gouttelettes tombent avec une vitesse d'autant plus réduite qu'elles sont fines par suite de la résistance que leur offre l'air* ». Si, à Lyon, les études sur le brouillard remontent aux années 30 et la création d'une commission locale, les études les plus récentes et les plus poussées se trouvent maintenant en région parisienne, dans le cadre du programme de recherche Paris-Fog<sup>5</sup>, avec des campagnes de mesure chaque hiver, dans le but d'améliorer les connaissances sur les interactions aérosols-gouttelettes afin de limiter les impacts sur les transports et la qualité de l'air. En Rhône-Alpes,

(5) <http://sirta.ipsl.polytechnique.fr/parisfog/>

le projet de recherche LEFE-PASSY<sup>6</sup> a des objectifs proches et a réalisé une campagne de mesure intensive début 2015, sur les communes de Passy et de Sallanches, dans la vallée de l'Arve, fortement touchée par des épisodes de pollution aux particules fines.

## 1.2. Une tendance globale à la baisse malgré une récente remontée

L'étude de l'évolution diachronique du nombre de jours de brouillard se heurte aux différences dans les modalités de l'observation du phénomène. Jusqu'en 1975, la station de Lyon-Bron faisait des observations 24 h/24, mais depuis, la station est fermée la nuit, ce qui entraîne une diminution dans les statistiques. Dans les années 2000, l'observation humaine a complètement disparu : un capteur de visibilité a été installé qui fonctionne jour et nuit, mais avec parfois de fortes marges d'erreur.

Les brouillards lyonnais se répartissent principalement d'octobre à février (figure 3), avec des maximums pour les mois de décembre et de janvier, avec respectivement 6,8 et 6,9 jours de brouillard par mois, en moyenne, sur la période 1921-2015<sup>7</sup>. En effet, avec 25 jours de brouillard par an sur la période 1981-2010, Lyon se place loin derrière des villes comme Mâcon (41 jours), Bordeaux (52) ou Limoges (82 – figure 4) et « *n'a jamais été, comme beaucoup l'ont pensé, la capitale française du brouillard* » (Comby, 1997).

Le déclin du brouillard est observé dans toutes les grandes villes européennes, et Lyon ne fait pas exception à la règle (Vautard et al., 2009) avec 70 jours de brouillard environ au début des années 20 et seulement une quinzaine à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, soit 0,53 jour/an (figure 5). Cette diminution était même déjà constatée depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, avant les premiers relevés à la station Météo-France de Lyon-Bron, par A. Allix qui écrivait en 1933 que « *les observateurs qui connaissent Lyon depuis longtemps sont unanimes à dire que depuis un quart de siècle le brouillard a considérablement diminué à l'intérieur de la ville, en fréquence, en intensité, en épaisseur* » (Allix, 1933).

Le test de tendance de Mann-Kendall (Mann, 1945) confirme cette tendance à la baisse avec un  $\tau$  (tau) de Kendall de -0,65 ( $\alpha = 0,05$  et p-value (unilatérale)  $< 0,0001$ ) et une pente de Sen de -0,55 (Cheng et al., 2015 ; Sen, 1968). Cette tendance se retrouve dans le test de Pettitt (Pettitt, 1979) qui indique une inhomogénéité dans les données et 1973 pour ce changement

(6) <http://www.air-rhonealpes.fr/actualite/des-scientifiques-etudient-finement-la-meteorologie-influençant-les-episodes-de-pollution>

(7) Données de la station Météo-France de Lyon-Bron.

( $K = 2125$  ;  $t = 1973$  ; p-value (bilatérale)  $< 0,0001$  et  $\alpha = 0,05$ ), et dans le test SNHT d'Alexandersson (Alexandersson, 1986 ;  $t = 1973$  ; p-value (bilatérale)  $< 0,0001$  et  $\alpha = 0,05$ ).

Il peut cependant être remarqué un accroissement depuis 1999, et nous connaissons aujourd'hui des valeurs annuelles similaires à celles du milieu des années 80, avec par exemple 42 journées de brouillard pour 2015. Le test de tendance de Mann-Kendall confirme cet accroissement sur la période 1999-2015 ( $\tau$  de Kendall = 0,51 ;  $\alpha = 0,05$  et p-value (unilatérale) = 0,03).

Nous remarquons les mêmes tendances concernant le poste Météo-France de Lyon-Satolas, situé à une vingtaine de kilomètres du centre-ville. Une diminution de la fréquence des brouillards depuis 1976 (date d'ouverture de la station :  $\tau$  (tau) de Kendall de -0,69,  $\alpha = 0,05$ , p-value (unilatérale) = 0,004 et pente de Sen = -0,37) puis une recrudescence à partir de 2000 ( $\tau$  (tau) de Kendall de 0,48,  $\alpha = 0,05$ , p-value (unilatérale) = 0,009 et pente de Sen = 0,96).

Trois explications principales sont avancées pour expliquer cette baisse (dans, par exemple, Comby (1997) et Vautard et al. (2009)) :

- la hausse des températures en milieu urbain liée à l'îlot de chaleur urbain, auquel se surajoute le réchauffement climatique global actuel (Jouzel et al., 2014). Cette hausse des températures repousse le seuil de condensation et limite ainsi la formation du brouillard.

- une atmosphère plus agitée, notamment la proportion des vents supérieurs à 1 m/s, défavorables à l'apparition du brouillard.

- un contrôle plus strict des rejets industriels dans l'air avec notamment l'interdiction de la combustion de biomasse dans des foyers ouverts en zone urbaine et la réduction des rejets de dioxyde de soufre, combinée à utilisation croissante des énergies durable (Comby, 1997 ; Vautard et al., 2009).

Or les températures minimales moyennes annuelles sont en augmentation depuis le début du siècle (figure 5), comme le révèle le test de Mann-Kendall et son  $\tau$  de 0,55 ( $\alpha = 0,05$  et p-value (unilatérale)  $< 0,0001$ ), passant de 6 °C environ au début des années 20 à 9 °C aujourd'hui. Le coefficient de corrélation entre le nombre de jours de brouillard annuel et la température minimale moyenne annuelle est de -0,73 et traduit ainsi une forte corrélation négative. Cette hausse des températures à la station de Lyon-Bron peut être expliquée par le changement climatique global mais aussi par le phénomène d'îlot de chaleur urbain, où des gradients décroissants de température de plusieurs

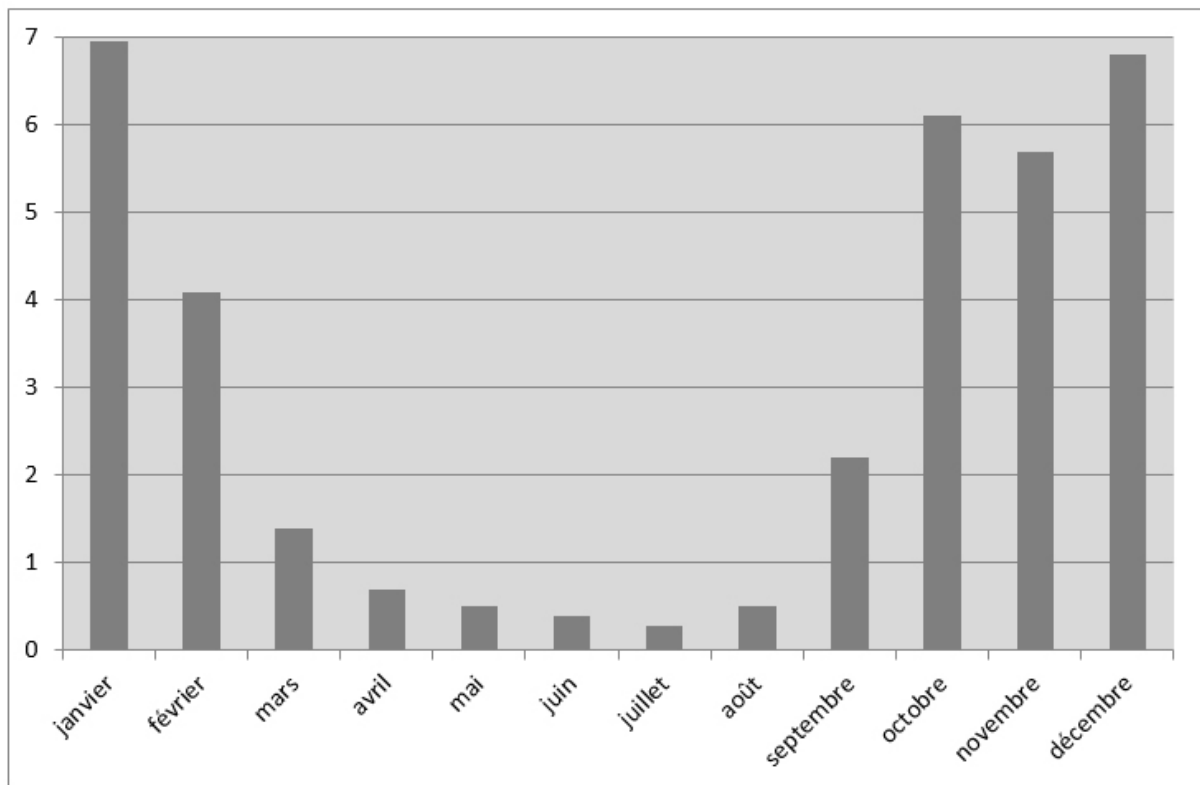


Figure 3. Nombre mensuel moyen de jours de brouillard à Lyon (1921-2015)  
 Figure 3. Monthly mean of number of foggy days in Lyon (1921-2015)

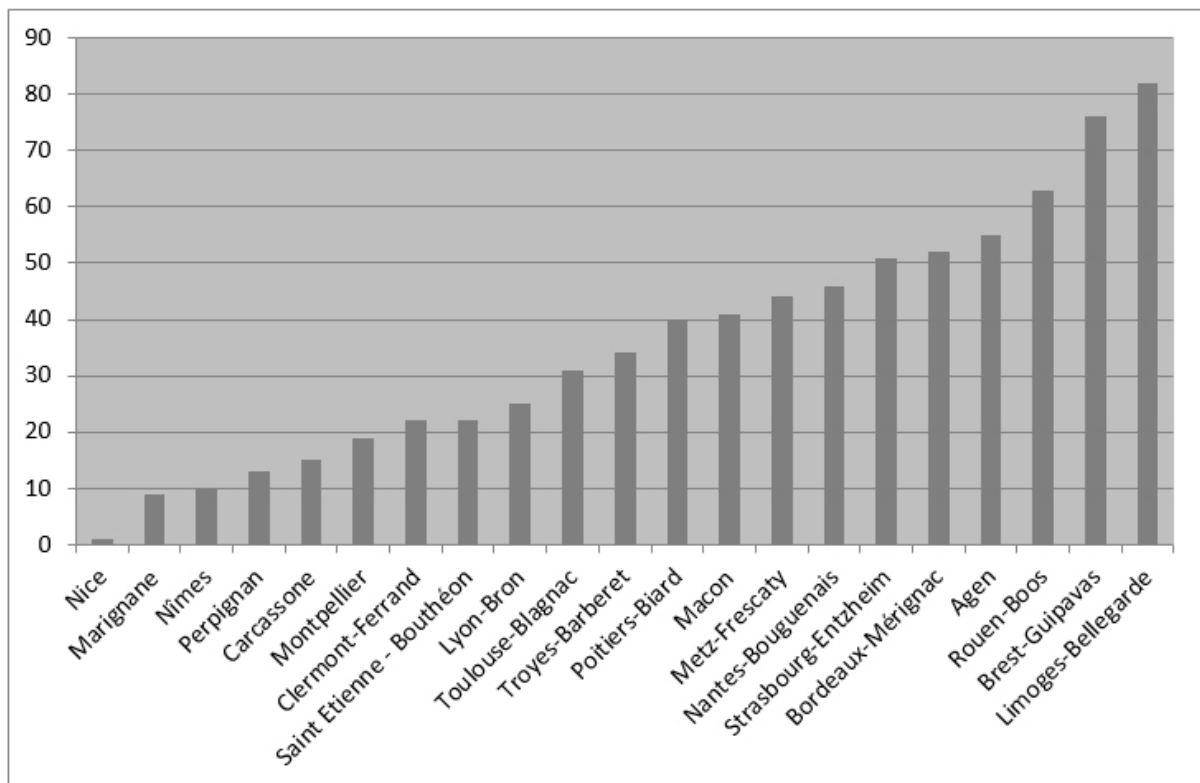


Figure 4. Nombre annuel de jours de brouillard par ville en France (calculé sur la période 1981-2010). (Source: Météo-France)  
 Figure 4. Annual number of days with fog for different towns in France (1981-2010; source: Météo-France)

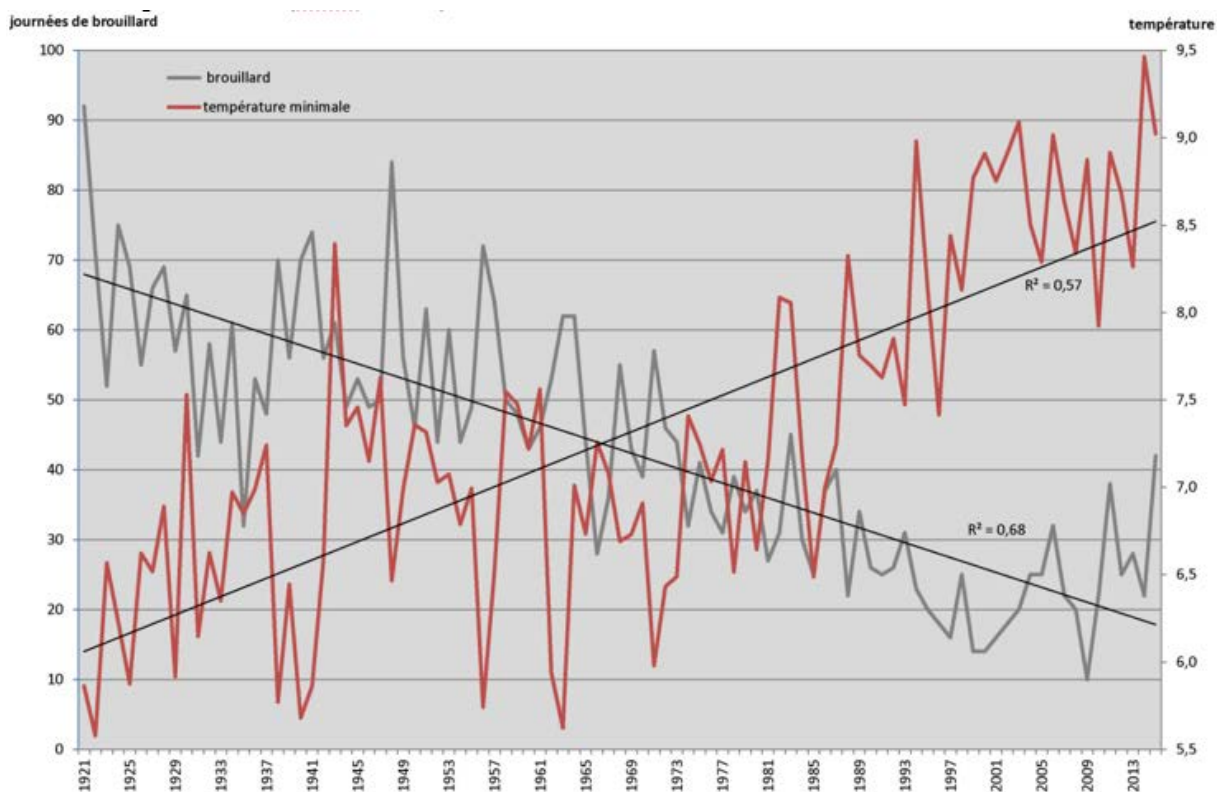


Figure 5. Nombre annuel de jours de brouillard et température minimale moyenne annuelle à Lyon (1921-2015)  
 Figure 5. Annual number of days with fog and annual average minimal temperature in Lyon (1921-2015)

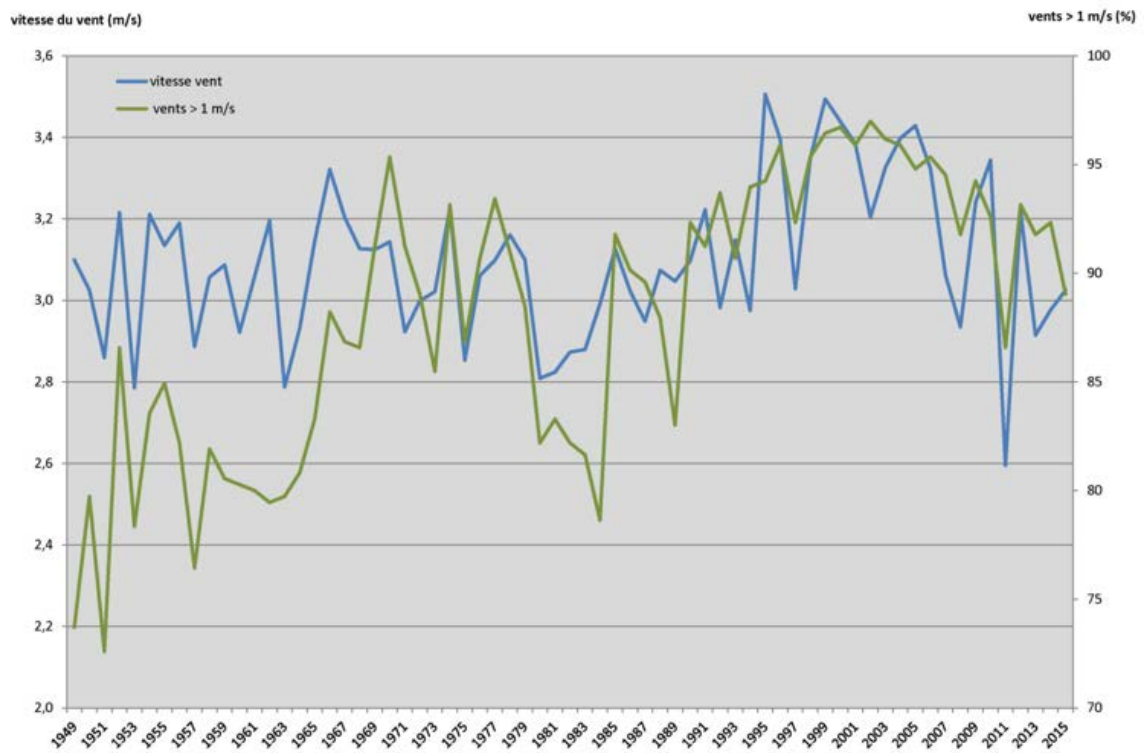


Figure 6. Moyenne annuelle de la vitesse du vent (à 10 m) (m/s) et proportion (%) des vents supérieurs à 1 m/s (1949-2015)  
 Figure 6. Annual average of the wind speed (in 10 m) (m/s) and proportion (%) of winds superior to 1 m/s (on 1949 - 2015)



degrés peuvent être observés, du centre lyonnais à la périphérie de l'agglomération, en fonction des saisons et des conditions météorologiques (Soto *et al.*, 2015 ; Diallo-Dudek, 2015).

Nous constatons aussi un brassage plus fort et plus fréquent de l'air, ce qui limite aussi la formation du brouillard (figure 6). Les tests de tendance de Mann-Kendall sur la vitesse du vent et la proportion des vents supérieurs à 1 m/s nous indiquent des tendances à la hausse avec respectivement des  $\tau$  de 0,16 et 0,53 ( $\alpha = 0,05$  ; p-values (unilatérale)  $\leq 0,03$ ). Il existe ici aussi une forte corrélation négative entre le nombre de jours de brouillard annuel et la proportion des vents supérieurs à 1 m/s, car le coefficient de corrélation est de -0,77. La conjugaison de ces deux paramètres peut ainsi expliquer la tendance à la baisse du nombre de jours de brouillard à Lyon depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle sous réserve de la comparabilité des anémomètres utilisés.

La hausse du nombre de jours de brouillards depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle pourrait s'expliquer par les baisses de la vitesse du vent constatée depuis 1999 et de la proportion des vents supérieurs à 1 m/s. Ces tendances à la baisse sont identifiées par le test de Mann-Kendall, avec des  $\tau$  respectifs de -0,56 et -0,75 (p-values (unilatérale)  $\leq 0,001$  ;  $\alpha = 0,05$ ). Le coefficient de corrélation entre le nombre de jours de brouillard et la vitesse du vent, sur la période 1999-2015, est de -0,54. La corrélation négative est encore plus forte entre le nombre de jours de brouillard et la proportion des vents supérieurs à 1 m/s, car le coefficient de corrélation atteint pour cette période une valeur de -0,72. Cette atmosphère moins agitée pourrait ainsi expliquer cette récente tendance à la hausse des jours de brouillard, malgré une augmentation des températures minimales qui se poursuit. Cette recrudescence des jours de brouillard est inquiétante pour les risques qu'elle induit, notamment pour le manque de visibilité et le ralentissement des circulations. Cependant, ces brouillards observés dans les années récentes, comme le montre la photo du 16 décembre 2015 (figure 2), sont beaucoup plus légers que les épisodes observés jusqu'aux années 1970 ; ceux-ci s'apparentaient beaucoup plus au *smog* qu'au *fog*. L'occurrence du brouillard, liée à une dégradation de la qualité de l'air, joue un rôle considérable sur le plan sanitaire, car « les rejets de polluants, dans une atmosphère stable et saturée en eau, peuvent conduire à une accumulation de composés pouvant avoir des effets nocifs sur la santé » (Bergot *et al.*, 2008). Ainsi, la deuxième partie de cet article s'intéresse aux relations entre les jours de brouillard et la qualité de l'air à Lyon, après avoir rapidement présenté les principaux polluants atmosphériques susceptibles d'être inhalés.

## 2. De fortes variations de la pollution atmosphérique lors des occurrences de brouillard

### 2.1 Principaux polluants atmosphériques en milieu urbain et effets sur la santé

D'après l'OCDE, « la pollution atmosphérique extérieure constitue un problème environnemental important qui pèse directement sur la qualité de vie des habitants. En dépit d'initiatives nationales et internationales et d'une baisse des principales émissions de contaminants, les effets de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé continuent de s'aggraver, et la pollution de l'air devrait devenir la première cause environnementale de mortalité prématurée au niveau mondial à l'horizon 2050 »<sup>8</sup>. Cette qualité atmosphérique est considérablement dégradée en milieu urbain, en raison notamment du transport routier, des rejets industriels et du chauffage domestique, surtout dans les pays du Sud gagnés par des phénomènes de métropolisation galopants (Kampa and Castanas, 2008 ; Revuelta *et al.*, 2014 ; Rodriguez, 2012 ; Vanos *et al.*, 2014, entre autres). L'agglomération lyonnaise, cadre de cette étude, n'est pas épargnée par cette pollution atmosphérique. Cependant, dans la plupart des grandes agglomérations de l'Europe occidentale, les niveaux de pollution ont considérablement diminué si on s'attache aux polluants issus de sources industrielles tels que le SO<sub>2</sub> mesuré autrefois à travers l'acidité forte et les fumées noires. En revanche, les connaissances sur les effets délétères de la pollution urbaine se sont considérablement enrichies et affinées.

Les différentes études de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) sur Lyon (Coparly, 2010 ; INVS, 2006) ont confirmé l'impact de la pollution particulaire sur la santé humaine en réduisant de 7 mois la durée de vie des Lyonnais âgés de plus de 30 ans, et en augmentant de 15 % l'asthme chez les enfants résidents à proximité du trafic routier. Pour les années 2001 et 2002, le nombre total de décès anticipés attribuables à la pollution atmosphérique s'élève à 424. L'agglomération lyonnaise possède les teneurs en particules fines et en dioxyde d'azote les plus élevées de la région Rhône-Alpes, et est visée par l'Union Européenne pour non-respect de la directive du 21 mai 2008, relative à la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Le brouillard peut avoir des effets sur cette qualité de l'air.

Il convient dès à présent de remarquer que ce n'est pas le brouillard en tant que tel qui fait augmenter la pollution. Les conditions météorologiques associées au brouillard sont favorables à un accroissement de

(8) <http://www.oecdbetterlifeindex.org/fr/topics/environnement/> (consulté le 15/01/2016)

la pollution (inversion thermique, subsidence, vents faibles ou nuls, etc.) mais le brouillard peut être un facteur péjorant de la qualité atmosphérique car il permet ou renforce le phénomène d'inversion thermique. En outre, le brouillard peut s'auto-entretenir en bloquant les rayons du soleil et ainsi accentuer cette inversion de température. Spécialement en milieu urbain, ce phénomène d'inversion a le désavantage de permettre la concentration des nombreuses sources urbaines de polluants atmosphériques. En outre, le brouillard a une action néfaste sur la santé en raison de son taux élevé d'humidité.

Ainsi, les fumées chaudes d'origine industrielle ou domestique qui s'élèvent dans un premier temps « se refroidissent et ne peuvent plus dépasser le sommet du brouillard en raison de l'inversion de température à ce niveau » (Comby, 1997). À Lyon, au début du siècle dernier, on pouvait remarquer « les jets de fumée de hautes cheminées qui percent de loin en loin la surface, s'arrêtent de monter, surpris par le froid, et retombent en s'étalant sur la mer de brouillard qu'ils tâchent de noir » (Onofrio, 1913). Cela vient ainsi charger l'atmosphère de divers polluants dont voici les principaux et leurs effets sur la santé :

- particules en suspension (PM) : ce sont des aérosols émis par des sources naturelles (poussières) et des sources anthropogéniques (chauffage au bois, moteurs à combustion, usures des pièces mécaniques ou des pneumatiques par frottement, centrales thermiques, processus industriels, etc.). Les particules se composent d'espèces ioniques primaires ou secondaires (à l'instar du nitrate, de l'ammonium ou du sulfate, créé à partir de  $\text{SO}_2$ ), d'espèces carbonées (la suie et d'autres composants organiques émis lors des processus de combustion) et de poussières minérales. Une distinction est faite entre les particules de moins de  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) de celles de moins de  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ). Ces dernières, dénommées particules fines, sont les plus dangereuses pour la santé. Sur la station de mesure de polluants de Lyon Centre, utilisée dans cette étude (figure 1), 72 % de la concentration en  $\text{PM}_{10}$  est constituée de  $\text{PM}_{2,5}$  entre 2007 et 2015. Cette proportion est en très légère baisse, d'après le test de Mann-Kendall (tau de Kendall = -0,053 ; pente de Sen = -0,01 ; p-value (unilatérale) < 0,0001 ; alpha = 0,05), mais a tendance à augmenter lors des pics de concentration. Les particules que nous respirons pénètrent dans les poumons, notamment les  $\text{PM}_{2,5}$ , et irritent les voies respiratoires inférieures. Elles présentent en outre des propriétés cancérigènes et mutagènes.

- Les premières mesures de la pollution atmosphérique à Lyon utilisaient l'indice de fumées noires pour évaluer les émissions de poussières qui ont joué un rôle considérable dans la formation des brouillards. La

diminution des fumées noires au cours du XX<sup>e</sup> siècle est spectaculaire dans les grandes villes industrielles ou à Paris<sup>9</sup>, son évaluation reste à quantifier à Lyon.

- Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) : l'oxydation de l'azote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) est responsable de leur formation suite à la combustion de carburants (notamment le gasoil) et de combustibles fossiles. Ces oxydes d'azote sont irritants pour les voies respiratoires, les bronches, les yeux et favorisent les infections pulmonaires chez la population infantile.

- Ozone ( $\text{O}_3$ ) : ce gaz n'est pas directement rejeté par les activités industrielles ou domestiques, mais se forme par une réaction chimique, à partir de polluants « précurseurs de l'ozone », notamment les oxydes d'azote (cf. ci-dessus) et les composés organiques volatils, initiée par le rayonnement ultraviolet du soleil. Ce composé irritant peut provoquer des irritations nasales et oculaires, des essoufflements, des toux, notamment chez les personnes les plus vulnérables telles que la population infantile et âgée, les personnes souffrant de pathologies chroniques ou aiguës et les asthmatiques.

- Dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) : sa source est principalement industrielle (chauffage domestique, centrales thermiques, etc.) et est à l'origine des pluies acides car il se transforme en acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) au contact de l'humidité de l'air. Irritant des voies respiratoires supérieures, il provoque des toux et des crises chez les personnes asthmatiques. Son effet nocif est décuplé en présence de particules fines.

- Composés Organiques Volatils (COV) : cette famille regroupe toutes les molécules formées d'atomes d'hydrogène et de carbone (hydrocarbures). Ce sont principalement des vapeurs d'hydrocarbures et de solvants divers et proviennent généralement des réservoirs de pétrole et d'essence, des procédés industriels (industries chimiques, raffinage de pétrole, stockage et distribution de carburants et combustibles liquides, stockages de solvants) mais également d'usages domestiques (utilisation de solvants, application de peinture) et de la combustion d'essence. Leurs effets sur la santé sont très divers en fonction de leur nature et peuvent provoquer des nuisances olfactives, des irritations et des déficiences des capacités pulmonaires, être responsables de céphalées et présentent des risques d'effets mutagènes et cancérigènes.

Les inversions thermiques favorisent la concentration de ces polluants, mais des réactions physico-chimiques peuvent également se dérouler dans le brouillard. Les oxydes de soufre ( $\text{SO}_2$  et  $\text{SO}_3$ ) et

(9) [http://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/publications/NUMERO7.pdf](http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/NUMERO7.pdf)

d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) sont susceptibles de se dissoudre dans les gouttelettes en suspension et participer à la création d'espèces acides pour former de l'acide sulfureux H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> et de l'acide nitrique HNO<sub>3</sub>, responsables de pluies acides (Glotfelty et al., 1987 ; Schindler, 1988). Le brouillard participe aussi à la transformation atmosphérique des COV, par condensation, en aérosols organiques secondaires, moins volatils, pouvant subsister sous forme particulaire une fois la gouttelette évaporée (Ervens et al., 2011 ; Brégonzio-Rozier et al., 2016).

L'occurrence des brouillards évolue dans le même sens que les niveaux observés de ces polluants qui ont des conséquences directes sur la santé des habitants de la métropole lyonnaise. La dernière partie de cette étude consiste à présenter le croisement des occurrences de brouillard avec les concentrations en polluants et en se focalisant sur des périodes temporelles fines.

## 2.2 Le brouillard à Lyon : beaucoup d'effets négatifs pour très peu d'effets positifs

### 2.2.1 Une augmentation de la concentration des polluants à l'exception de l'ozone

Les concentrations en polluants sont fournies par l'observatoire Air Rhône-Alpes<sup>10</sup>. Il s'agit d'une association de type « loi 1901 » agréée par le ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie pour la surveillance et l'information sur la qualité de l'air en Rhône-Alpes. Le choix de la station de mesure a été motivé par sa situation centrale au sein de la ville et par sa mesure des polluants de fond. La station de Lyon Centre a donc été choisie (figure 1) et les principales données utilisées dans cette étude sont disponibles depuis février 2007. Cette station de mesure est située à environ 8 km de la station météorologique de Lyon-Bron.

Une étude mettant en relation la forte diminution du nombre de jours de brouillard à Lyon depuis 1920 et la diminution de la pollution industrielle où la maîtrise des zones humides reste à entreprendre. En revanche, au cours de la période étudiée (2007-2015) la présence de brouillard est concomitante à une diminution de la qualité de l'air lyonnais et à une augmentation de l'indice de qualité de l'air ATMO. Cet indice permet de caractériser de manière simple et globale la qualité de l'air d'une agglomération urbaine, en allant de 1 (très bon) à 10 (très mauvais). Pour la période 2007-2015, l'indice ATMO lyonnais est de 4,3 (bon) quand le brouillard est absent, mais passe à 5,3 (moyen) avec sa présence. Le test de Mann-Whitney (Mann

and Whitney, 1947) indique une différence significative entre les échantillons ( $\alpha = 0,05$  et p-value (unilatérale)  $< 0,0001$ ).

Il convient de préciser dans un premier temps que tous ces polluants présentent des concentrations en baisse depuis début février 2007, à l'exception de celle en ozone qui reste stable (tableau 1). Cependant, à l'instar de l'indice ATMO, ces concentrations en polluants connaissent une forte augmentation lors de la présence de brouillard. Le test de Mann-Whitney a aussi été utilisé ici pour tester la significativité des différentes concentrations enregistrées lors de la présence ou de l'absence de brouillard. Ce test non paramétrique a été utilisé ici afin de s'affranchir de l'hypothèse de normalité des échantillons, les tests de Shapiro-Wilk (Shapiro et Wilk, 1965) et de Jarque-Berra (Jarque et Bera, 1980) les révélant inadéquats aux tests paramétriques. Les tests de Mann-Whitney sur les différentes concentrations indiquent tous une différence significative (p-value (unilatérale)  $< 0,0001$  et  $\alpha = 0,05$ ).

Plus précisément, nous constatons, lors des jours de brouillard, une augmentation des concentrations en oxydes d'azote qui avoisinent tous deux les 50 µg/m<sup>3</sup> (tableau 2). Le NO connaît une très forte augmentation, passant d'une concentration moyenne de 11,3 µg/m<sup>3</sup> à 48,4 µg/m<sup>3</sup>, soit un accroissement relatif de 329 %. Il en est de même pour les particules. Les PM<sub>10</sub> passent de 25,4 à 41,9 µg/m<sup>3</sup> et les PM<sub>2,5</sub> de 18,6 à 33,9 µg/m<sup>3</sup>. Même le SO<sub>2</sub> connaît un accroissement, passant de 2,3 à 3,7 µg/m<sup>3</sup>. À l'inverse, la concentration en O<sub>3</sub> connaît une forte baisse par jour de brouillard, passant en moyenne de 47 à 15,1 µg/m<sup>3</sup>. Cette diminution est expliquée par le blocage par la couche de brouillard du rayonnement solaire qui ne peut ainsi contribuer à la formation d'ozone troposphérique.

### 2.2.2 Variations horaires et dangers des brouillards persistants

La concomitance du brouillard et des pics de pollution se confirme aussi à l'échelle horaire (figure 7). Ainsi, nous assistons à un pic de NO en milieu de matinée et en soirée, qui atteint une concentration de 85 µg/m<sup>3</sup> puis de 55 µg/m<sup>3</sup> environ. Le NO<sub>2</sub> et les particules présentent aussi une augmentation nette, notamment durant les mêmes créneaux horaires que le NO. La baisse de concentration de l'ozone identifiée à l'échelle journalière se retrouve à l'échelle horaire. La variation quotidienne est similaire, avec un creux entre 8 h et 9 h et un pic vers 16 h, mais avec des concentrations inférieures d'environ 30 µg/m<sup>3</sup> pour chaque heure de la journée.

(10) <http://www.air-rhonealpes.fr/>

Tableau 1. Tendance des concentrations en principaux polluants (2007-2015), d'après le test de Mann-Kendall  
**Table 1. Trend of the concentrations in main pollutants (2007-2015), according to the test of Mann-Kendall**

	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
<b>p-value</b>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,446	< 0,0001	< 0,0001
<b>alpha</b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>τ de Kendall</b>	-0,1	-0,4	-0,1		-0,1	-0,2
<b>Pente de Sen</b>	-0,003	-0,001	-9,229E-4		-0,002	-0,002
<b>Tendance</b>	↘	↘	↘	=	↘	↘

Tableau 2. Concentrations (µg/m<sup>3</sup>) et accroissement relatif (%) des différents polluants lors de l'absence ou de la présence de brouillard

**Table 2. Concentrations (µg / m<sup>3</sup>) and relative increase (%) of various pollutants during the absence or during the presence of fog**

	NO <sub>2</sub>	NO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	SO <sub>2</sub>	ATMO
<b>absence de brouillard</b>	31,5	11,3	47,0	25,4	18,6	2,3	4,3
<b>présence de brouillard</b>	51,4	48,4	15,1	41,9	33,9	3,7	5,3
<b>accroissement (%)</b>	<b>+63,3</b>	<b>+329,2</b>	<b>-67,9</b>	<b>+64,8</b>	<b>+82,2</b>	<b>+61,7</b>	<b>+23,3</b>

Enfin, l'évolution de la concentration de PM<sub>10</sub> est étudiée lors des brouillards persistants plusieurs jours, heure par heure. On assiste à une constante et très forte augmentation de cette concentration avec les jours consécutifs de brouillard, allant même jusqu'à un accroissement de 30 µg/m<sup>3</sup> environ au troisième jour (figure 8). Il est à noter que le seuil d'information de 50 µg/m<sup>3</sup> est dépassé dès 10 h le deuxième jour de brouillard.

## Conclusion

Lyon a longtemps été connue pour ses brouillards, même si cette réputation de capitale française a quelque peu été exagérée. Ces derniers sont cependant en nette diminution depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Cette diminution de fréquence serait liée à l'augmentation des températures, notamment minimales, ainsi qu'à un brassage de l'air plus vigoureux. Outre son risque pour la circulation, l'occurrence du brouillard est synchrone à une dégradation de la qualité de l'air, avec des augmentations nettes des concentrations avec l'augmentation des niveaux observés d'oxydes d'azote, de particules et de dioxyde de soufre. À l'inverse, le brouillard, en bloquant le rayonnement solaire, a un effet bénéfique sur la concentration en ozone, qui diminue. Ces variations quotidiennes se retrouvent aussi à

l'échelle horaire et lors de la persistance du brouillard pendant plusieurs jours consécutifs. En effet, dans ce cas de figure, on assiste à une augmentation des polluants et des particules au fil des jours. Il est impossible d'anticiper la formation du brouillard. Plusieurs idées ont pourtant été proposées à Lyon au début du XX<sup>e</sup> siècle, comme « installer sur les hauteurs dominant la ville des machines soufflantes », « placer sur les collines de grands braséros pour réchauffer l'atmosphère », « projeter de l'air comprimé et réchauffé », émettre de « puissantes ondes hertziennes » ou répandre « une pellicule d'huile, infinitésimale, étendue à la surface de l'eau » (Onofrio, 1913). Cette dernière solution qui a été expérimentée sur l'Yonne et son canal latéral avait été recommandée à Lyon sur la Saône pour une application concrète. La disparition du brouillard ne suffirait pas à régler la question de la qualité de l'air qui doit faire l'objet d'une attention particulière. En revanche, la très nette diminution de la pollution industrielle a eu vraisemblablement un effet très bénéfique sur la diminution des jours de brouillard. Toutefois cette relation demanderait à être étudiée avec plus de précisions.

*Les auteurs remercient Météo-France et Air Rhône-Alpes pour la mise à disposition des données, ainsi que les relecteurs et leurs critiques constructives.*

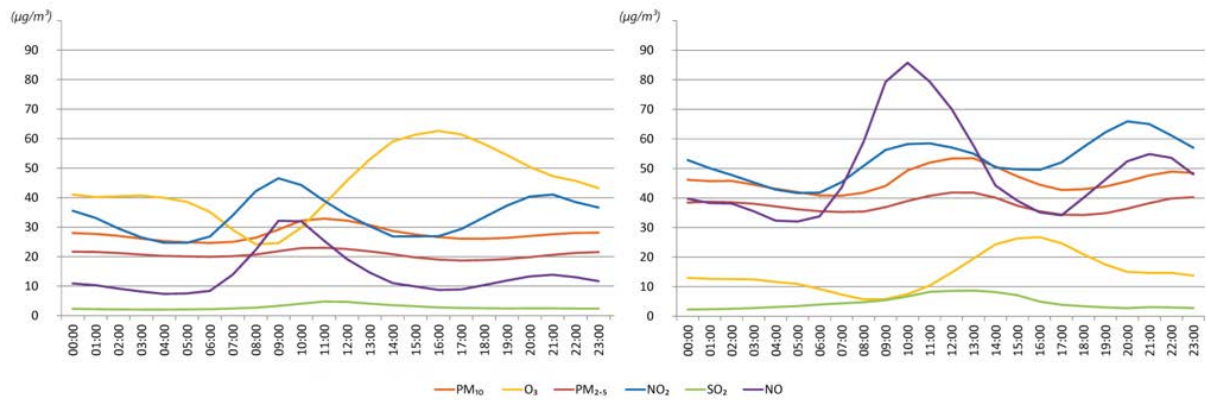


Figure 7. Évolution horaire moyenne de la concentration en principaux polluants lors de l'absence (à gauche) et de la présence de brouillard (à droite), 2007-2015

*Figure 7. Evolution of Hourly averages of main pollutants concentration during the absence (to the left) and during the presence of fog (to the right); on 2007-2015*

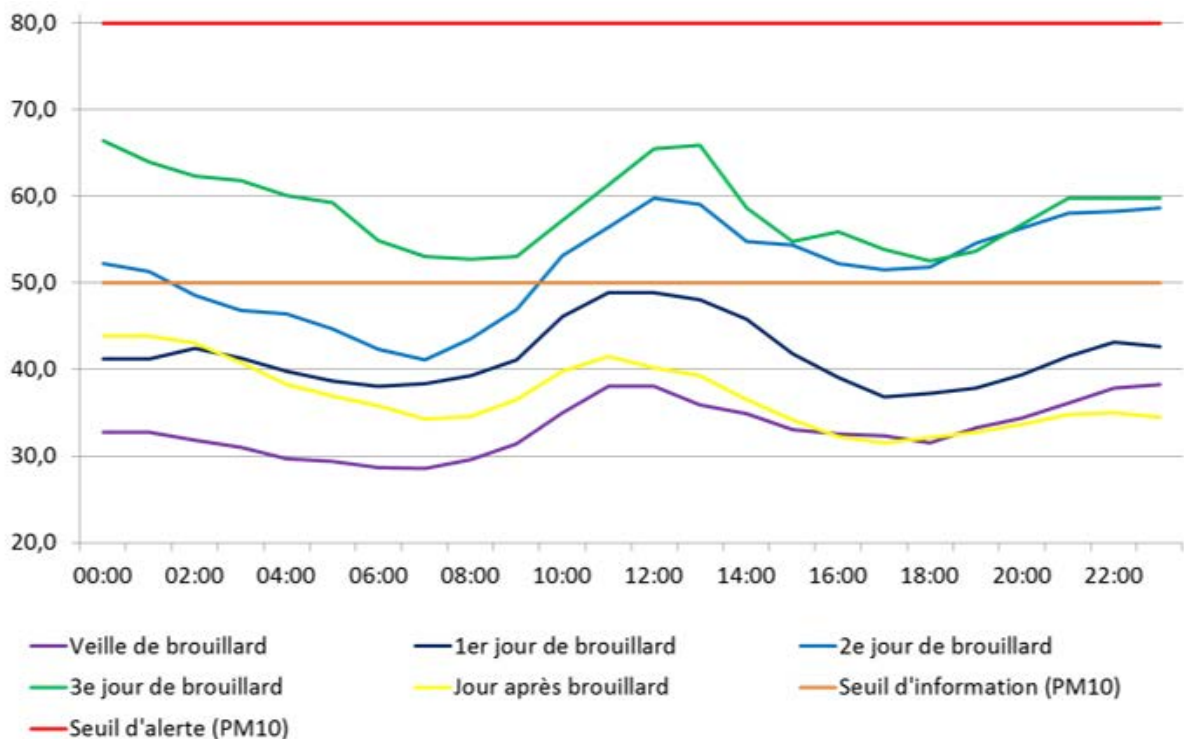


Figure 8. Concentration en PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) à Lyon Centre, en fonction de jours de brouillard consécutifs

*Figure 8. Concentration in PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Lyon Centre, according to consecutive days of fog*

## Références bibliographiques

- Alexandersson H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol*, n° 6, p. 661-675. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Alléon-Dulac JL. (1765). Mémoires pour servir à l'histoire naturelle des provinces de Lyonnais, Forez et Beaujolois par Alléon-Dulac. Cl. Cizeron.
- Allix A. (1933). À propos des brouillards lyonnais. 5. Obscurcissement progressif de l'atmosphère lyonnaise. La visibilité des Alpes. *Études Rhodan*, n° 9, p. 5-11. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1933.3915>
- Allix A. (1932). À propos des brouillards lyonnais. 4. Le brouillard mortel de Liège et les risques pour Lyon. *Études Rhodan*, n° 8, p. 133-144. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1932.3903>
- Allix A. (1931). Plan d'étude météorologique des brouillards lyonnais. *Études Rhodan*, n° 7, p. 299-307. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1931.3890>
- Bergot T, Haeffelin M, Musson-Genon L *et al.* (2008). Paris-Fog: researchers in the fog. *La Météorologie*, p. 48-58. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/19175>
- Brégonzio-Rozier L, Giorio C, Siekmann F *et al.* (2016). Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation during cloud condensation–evaporation cycles, *Atmos. Chem. Phys*, n° 16, p. 1747-1760.
- Cheng WL, Saleem A, Sadr R. (2015). Recent warming trend in the coastal region of Qatar. *Theor. Appl. Climatol*, p. 1-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-015-1693-6>
- Comby J. (1997). À propos des brouillards lyonnais. *Rev. Géographie Lyon*, n° 72, p. 333-337. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1997.4714>
- Coparly. (2010). L'air du Rhône et de la côte de l'Ain. Rapport annuel, Coparly, Lyon.
- Dupont JC. (2011). La campagne de mesure ParisFog. *La Météorologie*, p. 4-5.
- Diallo-Dudek J. (2015). Land Surface Temperature in the urban area of Lyon metropolis: a comparative study of remote sensing data and MesoNH model simulation. Actes du colloque Joint Urban Remote Sensing Event, Lausanne.
- Ervens B, Turpin BJ, Weber RJ. (2011). Secondary organic aerosol formation in cloud droplets and aqueous particles (aqSOA): a review of laboratory, field and model studies, *Atmos. Chem. Phys*, n° 11, p. 11069-11102.
- Favrot C. (1932). À propos des brouillards lyonnais. 3. Le brouillard à Lyon-Bron d'après dix années d'observations (1921-1930). *Études Rhodan*, n° 8, p. 9-40. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1932.5572>
- Frioux S. (2013). Problème global, action locale : les difficultés de la lutte contre les fumées industrielles à Lyon (1900-1960), dans *Débordements Industriels. Environnement, Territoire et Conflit XVIII<sup>e</sup>-XXI<sup>e</sup> siècle*. Presses Universitaires de Rennes, p. 317-333.
- Glotfelty D, Seiber J *et al.* (1987). Pesticides in fog. *Nature*, n° 325, p. 602-605.
- INVS. (2006). Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Agglomération de Lyon. Impacts à court et à long terme, DRASS Rhône-Alpes. éd. Lyon.
- Jarque CM, Bera AK. (1980). Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Econ. Lett*, n° 6, p. 255-259.
- Josserand L. (1949). Le climat de Lyon, d'après l'ouvrage du professeur Piéry. *Rev. Géographie Jointe Au Bull. Société Géographie Lyon Région Lyon*, n° 24, p. 121-126. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1949.5312>
- Jouzel J, Ouzeau G, Deque M *et al.* (2014). Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer.

- Kampa M, Castanas E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environ. Pollut.*, Proceedings of the 4th International Workshop on Biomonitoring of Atmospheric Pollution (With Emphasis on Trace Elements), n° 151, p. 362-367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- LeLay YF. (2014). Lyon, capitale des brouillards ? [En ligne] : <http://perso.ens-lyon.fr/yves-francois.le-lay/?p=673>
- Le Progrès. (2013). Quel drôle de temps ! Phénomènes météo exceptionnels de 1945 à nos jours, *Le Progrès*, éd. Lyon, 212 p.
- Limb C. (1933). À propos des brouillards lyonnais. 7. La visibilité du Mont-Blanc à partir de l'Observatoire de Fourvière, à Lyon. *Études Rhodan*, n° 9, p. 225-228. <http://dx.doi.org/10.3406/geoca.1933.5586>
- Mann HB. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, n° 13, p. 245-259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>
- Mann HB, Whitney DR. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Ann. Math. Stat*, n° 18, p. 50-60.
- Onofrio G. (1913). Le brouillard à Lyon. Comment il se forme – Comment l'en empêcher. *Ann. Sci. Phys. Nat. Agric. Ind*, n° 1, p. 8-35.
- Pettitt AN. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat*, n° 28, p. 126-135. <http://dx.doi.org/10.2307/2346729>
- Reverzy J. (1954). *Le Passage*, Paris, Julliard, 112 p.
- Revuelta MA, McIntosh G, Pey J. (2014). Partitioning of magnetic particles in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> aerosols in the urban atmosphere of Barcelona (Spain). *Environ. Pollut*, n° 188, p. 109-117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.01.025>
- Rodriguez D. (2012). Une multiplication des alertes à la pollution aux particules fines PM<sub>10</sub> : l'air de nos villes serait-il plus pollué ? *Pollut. Atmos*, p. 11-14.
- Roussel I. (2015). Épisodes de pollution et dispositifs d'alerte en France : une vision historique et sociopolitique. *Pollut. Atmos*, p. 40-66.
- Sachweh M, Koepke P. (1997). Fog dynamics in an urbanized area. *Theor. Appl. Climatol*, 58, p. 87-93. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00867435>
- Sachweh M, Koepke P. (1995). Radiation fog and urban climate. *Geophys. Res. Lett*, n° 22, p. 1073-1076. <http://dx.doi.org/10.1029/95GL00907>
- Schindler D. (1988). Effects of acid rain on freshwater ecosystems, *Science*, n° 239, p. 149-157.
- Sen PK. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc*, n° 63, p. 1379-1389. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shapiro SS, Wilk MB. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, p. 591-611.
- Soto D, Renard F, Thimonier-Rouzet E. (2015). Premières réflexions sur la préfiguration d'un observatoire lyonnais du climat, *Echo-géo*, n° 34, 12 p.
- Stendhal. (1838). *Mémoires d'un touriste*, Gallimard, Collection Folio classique (n° 5857). Paris.
- Tardif R, Rasmussen RM. (2007). Event-Based Climatology and Typology of Fog in the New York City Region. *J. Appl. Meteorol. Climatol*, n° 46, p. 1141-1168. <http://dx.doi.org/10.1175/JAM2516.1>
- Vanos JK, Hebborn C, Cakmak S. (2014). Risk assessment for cardiovascular and respiratory mortality due to air pollution and synoptic meteorology in 10 Canadian cities. *Environ. Pollut*, n° 185, p. 322-332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.007>
- Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ. (2009). Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nat. Geosci*, n° 2, p. 115-119. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo414>
- Vigneau JP. (2005). *Climatologie*, Paris, Armand Colin, Campus, 200 p.