

Note bibliographique

Feux d'artifices et qualité de l'air

Version 2 : février 2019

Siège social :

3 allée des Sorbiers 69500 BRON

Tel. 09 72 26 48 90

contact@atmo-aura.fr





Sommaire

I. Résumé	3
II. Introduction	4
III. Composition chimique	4
1 La poudre noire	4
2 Les autres composants	5
IV. Impact sur la qualité de l'air	5
1 Pollution particulaire	6
2 Pollution photo-oxydante	7
Ozone créé par arc électrique.....	7
Ozone créé par photolyse du dioxyde d'azote (NO ₂) ou de l'oxygène (O ₂).....	7
Rôle de catalyseurs des métaux.....	8
Le perchlorate.....	9
3 Recherche d'alternatives	10
V. Règlementation	10
VI. Conclusion	12

I. Résumé

Les feux d'artifice constituent déjà la plus grande source manufacturée de certains types de particules métalliques dans l'atmosphère (NAEI, 2016).

En Europe, la réglementation visant les feux d'artifice est essentiellement orientée vers l'accidentologie ou le détournement terroriste (mortiers), mais dans le monde certains pays ont toutefois introduit des dispositions relatives à la préservation de la qualité de l'air, notamment l'Inde (Doshi, 2011), la Chine (Ray, 2018).

En France, l'interdiction des feux d'artifice est une des mesures inscrites dans les arrêtés préfectoraux de gestion des épisodes de pollution atmosphérique, en Auvergne-Rhône-Alpes notamment, et ce pour les différents types d'épisode (combustion, mixte et estival). Cette mesure vient s'ajouter aux multiples autres, qui concernent tous les secteurs d'activités (agriculture, industries, résidentiel, transports) et visent à limiter la progression des taux de pollution dans les périodes météorologiques favorables à l'accumulation des polluants.

Les épisodes de type combustion et mixte se caractérisent très fréquemment par la présence de particules dans l'atmosphère. Dans ce contexte, l'interdiction des feux d'artifice semble ne pas faire débat tant il est reconnu qu'ils émettent des particules. En revanche, les épisodes estivaux sont liés à l'ozone, et la question de savoir si les feux d'artifice produisent de l'ozone est souvent posée, et dans le cas contraire quelle serait la justification de maintenir cette interdiction.

Il est par conséquent apparu nécessaire de dresser un état des lieux des connaissances relatives aux émissions de polluants par les feux d'artifice, objet de cette note basée sur une étude bibliographique non exhaustive. Cette étude met en évidence les nombreux polluants émis lors des tirs de feux d'artifice, dont certains avec un impact sanitaire avéré (particules, soufrés, COV, métaux, perchlorate, ...). Il s'agit de polluants directement émis et d'autres formés par réaction chimique catalytique du fait de la présence de certains métaux. Des effets de pics très marqués ont pu être mesurés, y compris en France, avec des taux horaires de particules PM10 supérieurs à 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Concernant l'ozone, les études se contredisent partiellement, certaines mettant en évidence une production d'ozone par un effet d'arc électrique, d'autres montrant que l'ozone n'en serait pas en réalité, du fait de la présence d'interférents à la mesure de l'ozone. Autrement dit, le paramètre mesuré ne serait pas de l'ozone, mais d'autres polluants, lesquels ont toutefois un potentiel sanitaire (composés organiques volatils, mercure, ...).

Des produits alternatifs sont d'ores et déjà utilisés ou à l'étude afin d'éviter le rejet de tels polluants, il conviendra toutefois de s'assurer de l'innocuité de ces substituts.

II. Introduction

L'amélioration de la qualité de l'air est devenue un enjeu environnemental majeur. Dans ce contexte, la gestion des épisodes de pollution par des arrêtés préfectoraux est un levier permettant de limiter la dégradation de la qualité de l'air pendant les périodes à risque. L'interdiction des feux d'artifice est une des mesures inscrites dans les arrêtés préfectoraux de gestion des épisodes de pollution atmosphérique en Auvergne-Rhône-Alpes, et ce pour les différents types d'épisode (combustion, mixte et estival). Cette mesure vient s'ajouter aux multiples autres, qui concernent tous les secteurs d'activités (agriculture, industries, résidentiel, transports) et visent à limiter la progression des taux de pollution dans les périodes météorologiques qui favorisent l'accumulation des polluants.

Les épisodes de type combustion et mixte se caractérisent très fréquemment par la présence de particules dans l'atmosphère. Dans ce contexte, l'interdiction des feux d'artifice semble ne pas faire débat tant il est reconnu qu'ils émettent des particules. En revanche, les épisodes estivaux sont liés à l'ozone, et la question de savoir si les feux d'artifice produisent de l'ozone est souvent posée, et dans le cas contraire quelle serait la justification de maintenir cette interdiction.

L'objet de cette note, basée sur une étude bibliographique non exhaustive, est de dresser un état des lieux des connaissances relatives aux émissions de polluants par les feux d'artifice. Elle est structurée en 3 parties principales. Dans la première partie, nous rappelons les principaux composants chimiques de feu d'artifice (§III). Dans la deuxième partie (§IV), nous présenterons les types de pollution associés aux feux d'artifice en citant au fur et à mesure certains travaux consacrés à étudier leurs impacts sur la qualité de l'air. Dans la dernière partie (§V), nous énumérons brièvement quelques textes réglementaires sur l'interdiction des feux d'artifice pendant les épisodes de pollution.

III. Composition chimique

La composition chimique des différents types de procédés pyrotechniques ainsi que leur mode d'explosion expliquent en grande partie leur impact environnemental. Le principe de base des feux d'artifice repose sur une combustion pyrotechnique, à partir de la poudre noire originelle contenant un composé oxydant (nitrate, chlorate ou perchlorate) qui libère de l'oxygène, et un composé réducteur qui sert de combustible (soufre et carbone en mélange avec des metalloïdes ou des métaux). À l'explosion pyrotechnique, de très hautes températures se produisent provoquant l'incandescence des particules d'oxydes métalliques formées lors de la combustion, d'où naissent les couleurs recherchées (du rouge vers 1000°C au blanc vers 3000°C), accompagnées d'effets acoustiques provoqués par la dilatation rapide de l'air comparable au tonnerre d'un orage. Plusieurs types de pièces existent : fusées, mortier réservé aux professionnels, bombes parfois à plusieurs étages, comètes....

1 La poudre noire

La poudre noire des feux d'artifice est constituée principalement de trois composants : charbon (carbone C, à 15%) et soufre (S, à 10%), qui sont les combustibles, et de salpêtre (nitrate de potassium KNO_3 , à 75%), qui est le comburant. Ce dernier joue le rôle d'un agent oxydant qui permet de produire l'oxygène nécessaire pour la combustion du mélange à l'intérieur du feu d'artifice.

2 Les autres composants

Les autres composants chimiques des feux d'artifice servent essentiellement à créer les différentes couleurs. Les principaux composants utilisés par les artificiers pour créer les différentes teintes sont : baryum (Ba), cuivre (Cu), sodium (Na), strontium (Sr) (Figure 1 et Tableau 1). Par exemple, le chlorure de cuivre est utilisé pour avoir du bleu, le potassium du violet, le sodium du jaune... (Verma et Deshmukh, 2014)

Couleurs Effets	Éléments	Composées + Formules Chimiques
Bleu	Zinc	Poudre de Zinc (Zn)
Violet	Potassium	Nitrate (KNO ₃) , Chlorate (KClO ₃)
Orange	Strontium Lithium	Nitrate de strontium (Sr(NO ₃) ₂) , Oxyde de strontium (SrO) , Hydroxyde de strontium (Sr(OH) ₂) ...
Orange	Calcium	Nitrate de calcium (Ca(NO ₃) ₂)
Jaune	Sodium	Oxalate de sodium (Na ₂ C ₂ O ₄) , Oxyde de sodium (Na ₂ O) , Nitrate de sodium (NaNO ₃)
Vert	Baryum Cuivre	Nitrate de baryum (Ba(NO ₃) ₂) , Chlorure de baryum (BaCl ₂) , Chlorure cuivreux (CuCl), Sulfate de cuivre (CSO ₄)
Blanc	Magnésium Aluminium	Poudre de magnésium (Mg) Poudre d'aluminium (Al)
Vert	Fer Carbone Souffre	Limaillerie de fer (Fe) Charbon (C) S
Argenté	Titane Aluminium	Poudre de titane (Ti) Poudre d'aluminium (Al)
Scintillant	Antimoine	Composé toxique (Sb)
Étincelles	Aluminium	Granules d'aluminium (Al)
Fumées	Zinc	Poudre de zinc (Zn)

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Composés	Formule chimique
Rouge	620-750	Nitrate de strontium	Sr(NO ₃) ₂
		Carbonate de strontium	SrCO ₃
		Sulfate de strontium	SrSO ₄
		Lithium	Li
Orange	590-620	Carbonate de calcium	CaCO ₃
		Chlorure de Calcium	CaCl ₂
		Sulfate de calcium	CaSO ₄
Jaune	570-590	Nitrate de sodium	NaNO ₃
		Oxalate de sodium	Na ₂ C ₂ O ₄
		Cryolite	Na ₃ AlF ₆
Or	590	Charbon	Charbon
		Fer	Fe
		Noir de carbone	C
Blanc électrique	564-576	Fusion du titane	Ti
		Fusion de l'aluminium	Al
		Fusion du béryllium	Be
		Fusion du magnésium	Mg
Vert	495-570	Nitrate de baryum	Ba(NO ₃) ₂
		Carbonate de baryum	BaCO ₃
		Chlorure de baryum	BaCl ₂
		Chlorate de baryum	Ba(ClO ₃) ₂
Bleu	450-495	Chlorure de cuivre(I)	CuCl
		Carbonate de cuivre	CuCO ₃
Indigo	450-420	Oxyde de cuivre	CuO
		Césium	Cs
Violet	380-450	Potassium	K
		Rubidium (rouge-violet)	Rb
Argent	412	Fusion Aluminium ou Magnésium	Al ou Mg
Scintillement		Antimoine	Sb
Étincelles		Aluminium	Al
Fumées		Zinc	Zn

Figure 1 : Composés métalliques utilisés dans la confection des feux d'artifice – Compilation d'après Verma et Deshmukh, 2014)

Tableau 1 ; - Composés métalliques utilisés dans la confection des feux d'artifice - Compilation d'après Canada (2011) et Interest Compound (2013)

IV. Impact sur la qualité de l'air

Les feux d'artifices libèrent dans la troposphère (basses couches de l'atmosphère) des gaz et des fumées (aérosols de micro- et nanoparticules) pouvant contenir des résidus de nitrates, de sulfates, de perchlorates et de métaux toxiques (et/ou catalytiques) présents à l'état de traces, sous forme ionique, solubles dans l'eau et inhalables (Chang et al, 2011; Drewnick et al, 2006; Kulshrestha et al, 2004; Moreno et al, 2007; Perrino et al, 2011; Thakur et al, 2010; Wang et al, 2007), et de nombreux autres composés classés toxiques et/ou polluants. En particulier ils libèrent sous forme de particules inhalables des composés de baryum, strontium, antimoine et d'autres métaux alors largement dispersés dans l'air (Camilleri and Vella, 2010). Ces métaux non dégradables sont susceptibles d'être inhalés à faibles doses par le public, les animaux et/ou de retomber dans les cours d'eau à proximité du spectacle pyrotechnique. Les concepteurs et spectateurs de spectacles pyrotechniques apprécient la proximité de la mer ou de plans d'eau pour profiter de « l'effet miroir » et pour des raisons de sécurité et de canalisation du public.

1 Pollution particulaire

La fumée résultante de la combustion des feux d'artifice peut contenir des composés toxiques (Kumar et al., 2016) notamment des soufrés et des métaux, et dégrader la qualité de l'air. Ainsi, le nuage de la combustion peut contenir des espèces nocives telles que l'ozone (Attri et al., 2001), le dioxyde de soufre et l'oxyde nitrique (Russel, 2009). Par exemple, en Auvergne Rhône-Alpes, la fumée des feux d'artifice a généré plusieurs fois une forte augmentation des concentrations des particules fines :

- Le samedi, 13 juillet « l'embrasement du ciel Romanais », comme on peut toujours le lire sur le site internet de la ville, a engendré un dépassement du seuil d'information et de recommandation en poussière. En effet, 15 minutes après la mise à feu sur les quais, les niveaux de poussières dans l'air ont augmenté pour rester élevés pendant plus d'une heure ($1075 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en une heure). Le phénomène est toutefois localisé et la présence de vent en soirée dans la zone a permis de limiter les conséquences de cette pollution.
- Une des stations de la zone urbaine des Pays de Savoie a été influencée par la fête du Lac d'Annecy qui s'est déroulée samedi 6 août 2011. Les particules fines émises par les feux d'artifices combinées à celles émises par les véhicules passant à proximité de la station ont atteint une concentration non négligeable dégradant la moyenne journalière et dépassant ainsi le seuil d'information et de recommandation des personnes sensibles ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière).
- Le 31 décembre 2014, les taux de pollution ont augmenté nettement à Chamonix, où les traditionnels feux d'artifice sont à l'origine de rejets massifs de particules. La basse vallée de l'Arve n'a pas été épargnée et a même connu les taux de particules les plus élevés de tout l'épisode de pollution, qui a duré du 31 décembre au 9 janvier. La concentration maximale horaire sur cette période est de l'ordre $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Par ailleurs, de nombreuses références européennes et internationales existent sur le sujet :

- En France, *AirParif* (2012) a montré un impact ponctuel de quelques heures du tir des feux d'artifice sur la qualité de l'air (un article d'*Airparif* concernant un 14 juillet (*AirParif*, 2012)). Ainsi, la concentration horaire la plus élevée observée en Ile-de-France entre 2007 et 2017 est associée au tir du feu d'artifice de Saint-Cloud, avec une valeur de $660 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (*AirParif*, 2017).
- En Espagne, la pollution par les métaux lourds particuliers provenant des feux d'artifice de la fête de Sant Joan à Gérone a duré plusieurs jours dans la ville (*Moreno et al.*, 2007).
- Dans les villes indiennes, les feux d'artifice annuels de Diwali provoquent des niveaux de pollution plus élevés que ceux de Pékin pendant une journée polluée (*Thakur et al.*, 2010). *Perrino* (2011) montre que durant ces 5 jours de feux d'artifice, l'ensemble du pays subit une forte augmentation de la pollution de l'air.
- Les scientifiques du « King's College London » ont montré que les feux d'artifice projetés à l'occasion de la fête du « Guy Fawkes » représentent la source majeure d'émission de polluants atmosphériques pour la journée la plus polluée de l'année en Royaume-Uni (*Green et al.*, 2012). Des observations similaires ont été faites lors de la fête de l'indépendance Day à New York (*Dickerson et al.*, 2017; *Wang et al.*, 2012).
- *Chatterjee et al.* (2013) ont montré que les activités pyrotechniques provoquent systématiquement une augmentation des concentrations des particules fines *PM10*, des hydrosolubles (espèces ioniques), de certains métaux sur les deux sites d'étude (Kankurgachi et Sinthi) au nord de Kolkata (anciennement Calcutta). La concentration maximale des *PM10* a atteint $711 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la nuit de Diwali, soit environ 5 fois la concentration nocturne moyenne d'une journée normale. L'augmentation des concentrations nocturnes des métaux sur Diwali par rapport à une nuit normale se retrouve aussi sur une large gamme des composantes chimiques (5 à 12 fois plus élevée pour les *Al*, *Zn*, *Pb* et *Cd*, 25 à 40 fois plus élevée pour les *Cu*, *Fe* et *Mn* et 70 à 80 fois plus élevée pour les *Co* et *V*). Les concentrations de polluants gazeux tels que le *SO2* et le *NO2* étaient 2 à 6 fois plus élevées pendant la journée du festival en raison de l'utilisation des feux d'artifice.

- Une étude de *Barman et al. (2008)* porte sur les effets des feux d'artifice sur la qualité de l'air pendant le festival de Diwali à Lucknow City. Les concentrations des PM10, du SO₂, des NOx et de 10 métaux ont été mesurées à quatre endroits représentatifs. Ces mesures ont été effectuées en continu avant, pendant et après la fête de Diwali. Les concentrations moyennes des métaux étaient bien plus élevées que les jours précédant à Diwali. Globalement, les concentrations des PM10, du SO₂ et des NOx sont 2 à 7 fois plus élevées pendant la fête de Diwali à Lucknow City.
- L'étude menée par *Joly et al. (2010)* au cours d'une représentation de l'International des Feux Loto-Québec à Montréal a signalé une concentration de PM_{2,5} égale à 10 000 µg/m³, soit 1000 fois supérieures aux valeurs enregistrées les jours précédents, et bien plus hautes que celles habituellement mesurées lors d'épisode de pollution (~ 80 µg/m³). La même étude démontre que les niveaux d'exposition relevés sur 1 heure pour des feux de même intensité dans la ville pouvaient atteindre 50 fois la concentration horaire moyenne urbaine (< 20 µg/m³) et plus de 10 fois la concentration horaire maximale (~ 120 µg/m³). Qui plus est, les quantités élevées de PM_{2,5} prélevées à moins de 2 km du lieu de lancement ont rapidement chuté vers les valeurs de fond, mais une aire de surveillance située à 14 km du site a tout de même enregistré des données cinq fois supérieures à la concentration moyenne annuelle en milieu urbain (~ 10 µg/m³) (*Joly et al., 2010*). Ce phénomène démontre que les particules émises dans l'air parcourent une distance importante dans l'axe du vent. D'ailleurs, le responsable du Réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal a confirmé que « les pires indices de qualité de l'air jamais enregistrés l'ont été des soirs de feux » (*Cameron, 2008*).

2 Pollution photo-oxydante

Ozone créé par arc électrique

Attri et al. (2001) ont montré que les feux d'artifice peuvent être considérés comme une nouvelle source potentielle d'ozone (O₃). Ces chercheurs expliquent que le processus de production de l'O₃ dans ce cas ne nécessite pas la présence des NOx. En effet, le processus sous-jacent de la formation d'ozone ressemble à celui induit par le rayonnement ultraviolet dans la stratosphère (par la photolyse de l'O₂). Dans cette étude, ils ont effectué une surveillance des concentrations de NOx (NO et NO₂), d'O₃ et d'autres paramètres météorologiques (température, humidité, ...) pendant la période festive de novembre 1999 (à Delhi). Pendant la nuit de projection des feux d'artifice, les niveaux d'O₃ mesurés ne sont pas négligeables. Un pic d'ozone (1902 microgrammes/m³) a été détecté entre 20h40 et 02h30. Pendant cette période, aucune corrélation n'a été trouvée entre la concentration de NOx et celle d'O₃, ce qui prouve qu'il était peu probable que l'ozone ait été généré dans des réactions impliquant des NOx. Par ailleurs, aucune production nocturne d'O₃ n'a été détectée aux autres dates. Ce même mécanisme a été confirmé par *Caballero et al. (2015)* pendant les feux d'artifice tirés à la fête de la ville Alicante en Espagne. Ce phénomène est le même que celui qui peut être observé au moment des orages, par l'éclair.

Ozone créé par photolyse du dioxyde d'azote (NO₂) ou de l'oxygène (O₂)

Comme indiqué précédemment, les feux d'artifice sont des sources intensives de polluants atmosphériques. Certains sont des interférents à la mesure d'ozone (O₃), notamment le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, les particules en suspensions, le mercure, les COV (*Li et al., 2013; Lin, 2016; Nishanth et al., 2012*), comme l'ont montré *Fiedrich et al. (2017)* et *Xu et al. (2018)*. Ces derniers ont testé deux types de feux d'artifice, en laboratoire et in situ, avec différents niveaux d'énergie. Ils ont mis en évidence que la combustion de la poudre noire et du carton pourrait être une source potentielle des COV, lesquels interfèrent avec l'appareil de mesure de l'O₃. Il n'y aurait donc pas de production d'ozone par photolyse du dioxyde d'azote ou de l'oxygène (qui est le mécanisme « standard » de formation de l'ozone en journée ensoleillée) du fait des feux d'artifice.

Rôle de catalyseurs des métaux

Une partie des métaux composant les poudres pyrotechniques se comportent aussi comme des catalyseurs qui complexifient les réactions chimiques lors des explosions et combustions, pouvant favoriser l'apparition d'autres polluants.

Wang *et al.* (2007) évaluent les effets de la combustion des feux d'artifice sur la qualité de l'air à Beijing à partir des concentrations mesurées de divers polluants atmosphériques (SO_2 , NO_2 , PM_{25} , PM_{10} et d'autres composants chimiques dans les particules) lors du festival des lanternes en 2006. A total, dix-huit ions et 20 éléments chimiques ont été mesurés.

Les concentrations des composants primaires de Ba , K , Sr , Cl , Pb , Mg et les composants secondaires de $C_5H_6O_4^{-2}$, $C_3H_2O_4^{-2}$, $C_2O_4^{-2}$, $C_4H_4O_4^{-2}$, SO_4^{-2} , NO_3^- étaient cinq fois plus élevées pendant le jour de la fête. Cette étude montre que :

- le nitrate était principalement formé par des réactions en phase gazeuse du NO_2 , tandis que le sulfate provenait en grande partie de transformations catalytiques hétérogènes du SO_2 .
- le fer (Fe) pourrait catalyser la formation de nitrate par la réaction de $\alpha\text{-Fe}_2O_3$ avec HNO_3 , tandis que dans la formation de sulfate, le fer (Fe) n'est pas seulement le catalyseur, mais aussi l'oxydant.

Joly *et al.* (2010) étudient l'impact des feux d'artifice lancés pendant le concours international de feux d'artifice de Montréal (version 2007)

La figure ci-dessous (Figure 2) montre que les concentrations de certaines espèces chimiques telles que le K, Cl, Al, Mg et Ti sont nettement plus élevées dans les filtres exposés au panache des feux d'artifice (hist. en noir).

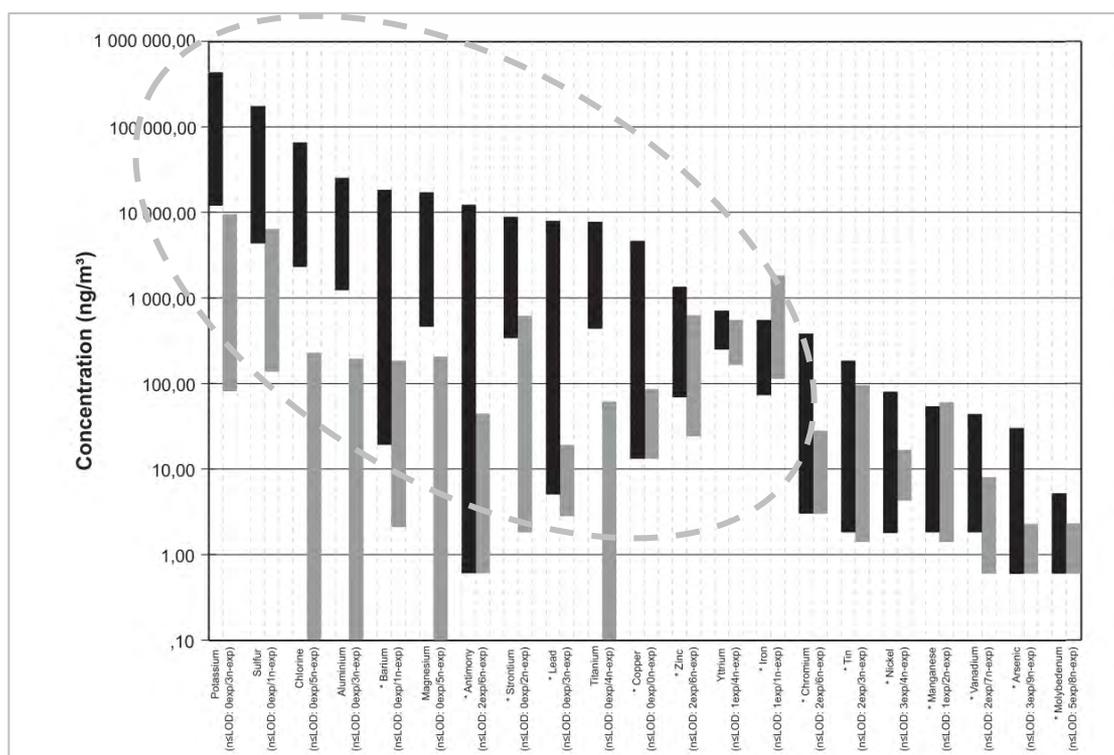


Figure 2: Concentrations maximales et minimales pour les filtres "exposés" (en noir) et "non exposés" (en gris) au panache des feux d'artifice

Vecchi *et al.* (2008) ont étudié les propriétés physico-chimiques des particules en suspension dans l'air (ions, carbone organique, ...) recueillies pendant la projection des feux d'artifice à Milan (Italie). Dans cette étude, le strontium (Sr) a été reconnu comme le meilleur traceur pour les feux d'artifice, car sa concentration était très élevée pendant l'événement (**56 fois plus élevée**) (Figure 3).

Une pollution photochimique complémentaire peut intervenir dès la journée du lendemain si le soleil est présent ou si les nuages laissent passer les UV solaires. Ce phénomène contribue à produire des « polluants secondaires » ($C_5H_6O_4^{2-}$, $C_3H_2O_4^{2-}$, $C_2O_4^{2-}$, $C_4H_4O_4^{2-}$, SO_4^{2-} , NO_3^-), qui, selon une étude publiée en 2007 (Wang *et al.*, 2007) « étaient plus de cinq fois plus élevés lors de la fête des lanternes en Chine qu'en temps normal ». Des hydrocarbures polychlorés sont aussi produits (Perrino *et al.*, 2011).

Les nitrates et sulfates qui se forment respectivement par oxydation des NO_2 et de manière catalytique à partir du SO_2 (Verma *et Deshmukh*, 2014) sont à la fois eutrophisants et acidifiants.

Depuis les années 2000-2010 de nouveaux composants sont apparus pour produire de nouvelles couleurs et des couleurs plus vives, parfois presque fluorescentes ou électriques, par ajout notamment d'alliages de magnésium et d'aluminium magnalium. On voit aussi apparaître des bleus intenses qui n'existaient pas (Perrino *et al.*, 2011).

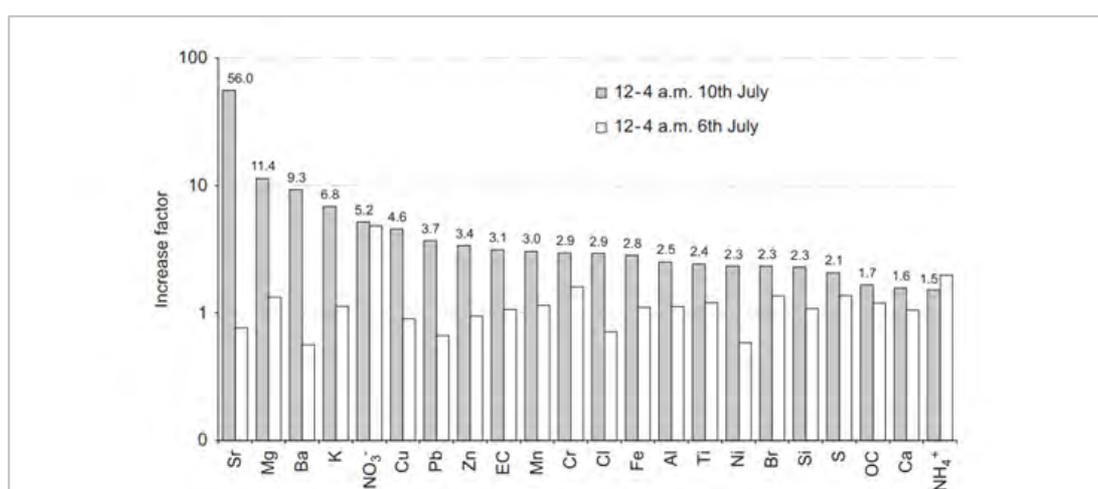


Figure 3 : le ratio entre les concentrations des différents composés chimiques mesurées pendant le tir de feux d'artifice et les concentrations moyennes des mêmes espèces observées les jours qui précèdent la fête de feux d'artifice (histogramme en gris). Les mêmes ratios sont calculés pour la veille de la journée du tir de feux d'artifice (histogramme en blanc)

Le perchlorate

Selon Shi *et al.* (2011) plusieurs pics de perchlorate inhalable (dans les particules PM10) et de perchlorate dans les particules plus grosses (PM10 à PM100) ont été enregistrés durant et après les feux d'artifices marquant la fête du Nouvel An chinois (18 février 2007), d'après les analyses d'air faites dans la Ville de Lanzhou et dans le Comté de Yuzhong dans la Province du Gansu en Chine. Des perchlorates ont effectivement été retrouvés dans presque tous les échantillons, à des doses allant de la limite de détection à $39,16 \text{ ng/m}^3$ (Figure 4). Les auteurs concluent que « les feux d'artifice utilisés lors de la Fête du Printemps peuvent entraîner une augmentation des niveaux de perchlorate » dans l'environnement.

Très utilisé par la pyrotechnie et retrouvé dans l'air pendant et après les feux d'artifice, le perchlorate est un sel de l'acide perchlorique très soluble dans les pluies, brumes, rosées et eaux de surface. Même à faible concentration dans l'eau il cause des déficits neurodéveloppementaux importants et le goître chez les nourrissons et les enfants en empêchant la thyroïde de bien fixer l'iode dont elle a besoin. Pour la même raison il peut aussi nuire à la régulation du métabolisme de l'adulte, ce qui en fait un perturbateur endocrinien problématique.

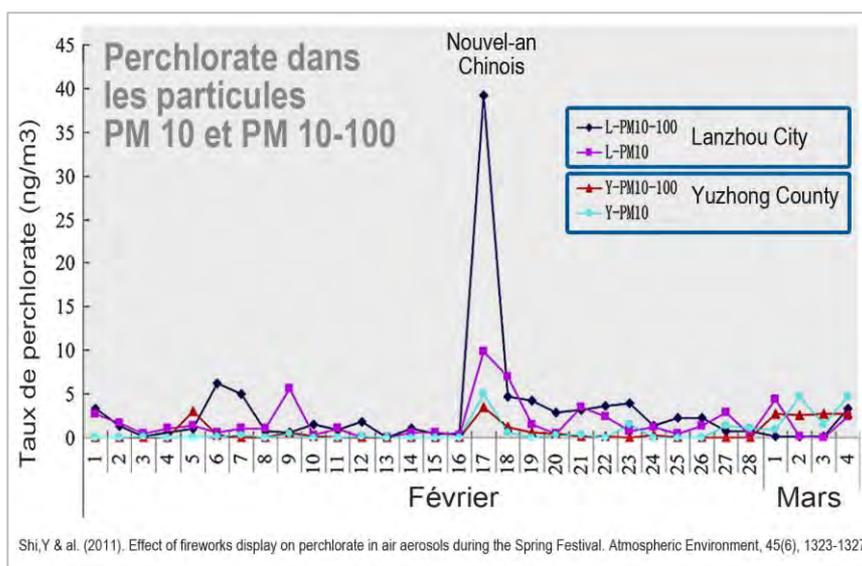


Figure 4 : Taux de perchlorate en ng/m³ associés au tir de feux d'artifice (Shi et al., 2011)

3 Recherche d'alternatives

Des métaux comme le plomb ou le mercure (sous forme de fulminate de mercure encore présents dans certains pétards) présentent une toxicité indéniable mais ils semblent encore présents dans certains composants pyrotechniques.

L'EPA encourage depuis 2007 des alternatives moins toxiques. En 2009, des entreprises américaines mettant sur le marché des feux d'artifice ont affirmé travailler avec des fabricants chinois pour mettre au point des fusées moins polluantes pour notamment réduire le perchlorate (puis peut-être un jour l'éliminer) (Knee, 2009; Seidel and Birnbaum, 2015). Il reste à démontrer que ces molécules ne poseront pas de problème sanitaire.

Des universitaires de Munich ont produit des bleus encore plus vifs avec du bromure de cuivre, sans composés chlorés (bromate de cuivre [Cu (BrO₃)₂] comme oxydant et hexamine comme combustible) (Wilson, 2017).

En 2014, un laboratoire de recherche militaire sur les explosifs a proposé un composé émettant une lumière verte très intense, à base de tris(2,2,2-trinitroethyl)borate et de carbure de bore (Knee, 2009), il surpasse selon eux le baryum.

Les rouges faciles à produire avec des composés de strontium toxiques n'ont pas encore d'alternative écologiques (Perrino et al., 2011).

V. Règlementation

En Europe, la réglementation visant les feux d'artifice est essentiellement orientée vers l'accidentologie ou le détournement terroriste (mortiers), mais certains pays ont toutefois introduit des dispositions relatives à la préservation de la qualité de l'air, notamment l'Inde (Doshi, 2011), la Chine (Ray, 2018) et la France où certaines mesures ont été mentionnées dans les arrêtés préfectoraux (DREAL AURA, 2018).

Aux Etats-Unis, l'EPA ne réglemente pas les feux d'artifice, mais recommande aux personnes sensibles à la pollution, comme les petits enfants ou les personnes souffrant de maladies cardiaques ou pulmonaires, "de limiter leur exposition en regardant les feux d'artifice du plus loin possible.". Les médecins allemands (Noack, 2017) ont recommandé l'utilisation des masques et des appareils de protection respiratoire (masque anti-pollution) pour les personnes exposées ou/et à proximité des feux d'artifice.

En 2017 en Inde, bien qu'il s'agisse d'un évènement culturel et traditionnel majeur, la justice a interdit certains pétards, feux d'artifice et feux de Bengale pour les fêtes de Diwali, en raison des graves pics de pollution qu'ils ont généré les années précédentes.

En France, comme évoqué en introduction, plusieurs arrêtés préfectoraux interdisent le tir des feux d'artifice lors des épisodes de pollution.

REGLEMENTATION FRANÇAISE (ESSENTIELLEMENT LIEE A L'ACCIDENTOLOGIE OU AUX USAGES DETOURNES)

- [↑ Décret n°2009-1663 du 29 décembre 2009 modifiant le décret n°90-897 du 1^{er} octobre 1990 portant réglementation des artifices de divertissement \[archive\] - Légifrance](#)
- [↑ « Code de l'environnement » \[archive\], sur <http://www.legifrance.gouv.fr> \[archive\]](#)
- [↑ « Code de l'environnement » \[archive\], sur <http://www.legifrance.gouv.fr> \[archive\]](#)
- [↑ Décret n° 2010-455 du 4 mai 2010 \[archive\] - Légifrance](#)
- [↑ « Arrêté du 1^{er} juillet 2015 relatif à la mise sur le marché des produits explosifs » \[archive\], sur <http://www.legifrance.gouv.fr> \[archive\]](#)
- [↑ Décret n° 2010-580 du 31 mai 2010 \[archive\] - Légifrance](#)
- [↑ Arrêté du 31 mai 2010 \[archive\] - Légifrance](#)
- [Le dispositif de gestion des pics de pollution en Auvergne-Rhône-Alpes](#)

VI. Conclusion

L'étude d'impact de feux d'artifice sur la qualité de l'air dans des milieux urbains est devenu ces dernières années un sujet important de recherche environnementale dans la mesure où ces travaux permettent aux autorités de prendre les meilleures décisions afin de limiter la dégradation de la qualité de l'air et l'exposition des citoyens aux polluants toxiques.

Cette note expose une brève revue bibliographique donnant un aperçu global sur la composition chimique des feux d'artifice et leurs impacts sur la pollution particulaire et photo-oxydante dans plusieurs villes dans le monde. Même si la réglementation ne prévoit pas toujours (dans tous les pays) des textes spécifiques sur l'impact environnemental des feux d'artifice, toutes les études scientifiques mettent en évidence les nombreux polluants émis lors des tirs de feux d'artifice, dont certains avec un impact sanitaire avéré (particules, soufres, COV, métaux, perchlorate, ...). Il s'agit de polluants primaires directement émis et d'autres dit secondaires formés par réactions chimiques catalytiques du fait de la présence de certains métaux. Des effets de pics très marqués ont pu être mesurés, y compris en France, avec des taux horaires de particules PM10 supérieurs à 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Concernant l'ozone, la plupart des travaux existant mettent en évidence une production d'ozone par un effet d'arc électrique. Ils ont montré que les feux d'artifice peuvent être considérés comme une nouvelle source potentielle d'ozone (O_3). Les chercheurs expliquent que le processus de production de l' O_3 dans ce cas ne nécessite pas la présence des NOx. En effet, le processus sous-jacent de la formation d'ozone ressemble à celui induit par le rayonnement ultraviolet dans la stratosphère (par la photolyse de l' O_2). Pendant le tir de feux d'artifice, ces chercheurs ont observé aucune corrélation entre la concentration de NOx et celle d' O_3 , ce qui prouve qu'il était peu probable que l'ozone ait été généré dans des réactions impliquant des NOx. Le même phénomène peut être observé au moment des orages, par l'éclair.

Récemment, quelques études montrent que l'ozone mesuré est plutôt « artificiel » et n'en serait pas en réalité, du fait de la présence d'interférents à la mesure de l'ozone. Autrement dit, le paramètre mesuré ne serait pas de l'ozone, mais d'autres polluants, lesquels ont toutefois un potentiel sanitaire (composés organiques volatils, mercure, ...). En effet, la combustion de la poudre noire et du carton pourrait être une source potentielle de COV, lesquels interfèrent avec l'appareil de mesure de l' O_3 . Il n'y aurait donc pas de production d'ozone par photolyse du dioxyde d'azote ou de l'oxygène (qui est le mécanisme « standard » de formation de l'ozone en journée ensoleillée) du fait des feux d'artifice.

L'interdiction de feux d'artifice est un des leviers permettant de limiter la dégradation de la qualité de l'air lors des périodes à risque (épisodes de pollution), en évitant l'émission de composés nocifs tels que les particules, les COV, le perchlorate, voire l'ozone. Des produits alternatifs sont d'ores et déjà utilisés ou à l'étude afin d'éviter le rejet de tels polluants, il conviendra toutefois de s'assurer de l'innocuité de ces substituants.

BIBLIOGRAPHIE :

- AirParif, 2017. Bilan de la qualité de l'air - Année 2017 - Surveillance et information en Île-de-France.
- AirParif, 2012. Airparif - Actualités - Quel impact du feu d'artifice du 14 juillet? [WWW Document]. URL <https://www.airparif.asso.fr/actualite/detail/id/58>.
- Attri, A.K., Kumar, U., Jain, V.K., 2001. Microclimate: Formation of ozone by fireworks. *Nature* 411, 1015. <https://doi.org/10.1038/35082634>
- Barman, S.C., Singh, R., Negi, M.P.S., Bhargava, S.K., 2008. Ambient air quality of Lucknow City (India) during use of fireworks on Diwali Festival. *Environ. Monit. Assess.* 137, 495–504. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9784-1>
- Caballero, S., Galindo, N., Castañer, R., Giménez, J., Crespo, J., 2015. Real-Time Measurements of Ozone and UV Radiation during Pyrotechnic Displays. *Aerosol Air Qual. Res.* 15, 2150–2157. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0204>
- Cameron, D., 2008. Feux d'artifice: un risque pour la santé? La Presse. [Doc Web] : <https://www.lapresse.ca/actualites/200809/08/01-657520-feux-dartifice-un-risque-pour-la-sante.php>
- Camilleri, R., Vella, A.J., 2010. Effect of fireworks on ambient air quality in Malta. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.057>
- Chang, S.-C., Lin, T.-H., Young, C.-Y., Lee, C.-T., 2011. The impact of ground-level fireworks (13 km long) display on the air quality during the traditional Yanshui Lantern Festival in Taiwan. *Environ. Monit. Assess.* 172, 463–479. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1347-1>
- Chatterjee, A., Sarkar, C., Adak, A., Mukherjee, U., Ghosh, S., Raha, S., 2013. Ambient Air Quality during Diwali Festival over Kolkata - A Mega-City in India. *Aerosol and Air Quality Research* 13, 1133–1144.
- Dickerson, A.S., Benson, A.F., Buckley, B., Chan, E.A.W., 2017. Concentrations of individual fine particulate matter components in the USA around July 4th. *Air Qual. Atmosphere Health* 10, 349–358. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0433-0>
- Doshi, V., 2011. Hindu Diwali festival without fireworks? The Supreme Court says Delhi needs to breathe. *Wash. Post.* https://www.washingtonpost.com/news/worldviews/wp/2017/10/09/hindu-diwali-festival-without-fireworks-the-supreme-court-says-delhi-needs-to-breathe/?utm_term=.8250041ad6eb
- DREAL AURA, 2018. Le dispositif de gestion des pics de pollution [WWW Document]. URL <http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/le-dispositif-de-gestion-des-pics-de-pollution-a13991.html> (accessed 1.28.19).
- Drewnick, F., Hings, S.S., Curtius, J., Eerdekens, G., Williams, J., 2006. Measurement of fine particulate and gas-phase species during the New Year's fireworks 2005 in Mainz, Germany. *Atmos. Environ.* 40, 4316–4327. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.040>
- Fiedrich, M., Kurtenbach, R., Wiesen, P., Kleffmann, J., 2017. Artificial O₃ formation during fireworks. *Atmos. Environ.* 165, 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.028>
- Green, D., Tremper, A., Priestman, M., Hamad, S., Canonaco, F., 2012. Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} at kerbside, London, UK. Presented at the European Aerosol Conference, Granada.
- Joly, A., Smargiassi, A., Kosatsky, T., Fournier, M., Dabek-Zlotorzynska, E., Celio, V., Mathieu, D., Servranckx, R., D'amours, R., Malo, A., Brook, J., 2010. Characterisation of particulate exposure during fireworks displays. *Atmos. Environ.* 44, 4325–4329. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.010>

- Knee, K., 2009. Pa. company works to make fireworks greener [WWW Document]. <http://www.philly.com>. URL http://www.philly.com/philly/business/20090704_Pa_company_works_to_make_fireworks_greener.html
- Kulshrestha, U.C., Nageswara Rao, T., Azhaguvel, S., Kulshrestha, M.J., 2004. Emissions and accumulation of metals in the atmosphere due to crackers and sparkles during Diwali festival in India. *Atmos. Environ.* 38, 4421–4425. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.044>
- Kumar, M., Singh, R.K., Murari, V., Singh, A.K., Singh, R.S., Banerjee, T., 2016. Fireworks induced particle pollution: A spatio-temporal analysis. *Atmospheric Res. C*, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.05.014>
- Li, W., Shi, Z., Yan, C., Yang, L., Dong, C., Wang, W., 2013. Individual metal-bearing particles in a regional haze caused by firecracker and firework emissions. *Sci. Total Environ.* 443, 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.109>
- Lin, C.-C., 2016. A review of the impact of fireworks on particulate matter in ambient air. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 66, 1171–1182. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1219280>
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Cruz Minguillón, M., Pey, J., Rodriguez, S., Vicente Miró, J., Felis, C., Gibbons, W., 2007. Recreational atmospheric pollution episodes: Inhalable metalliferous particles from firework displays. *Atmos. Environ.* 41, 913–922. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.019>
- NAEI, 2016. Overview of air pollutants - Defra, UK [WWW Document]. URL <http://naei.beis.gov.uk/overview/ap-overview>.
- Nishanth, T., Praseed, K.M., Rathnakaran, K., Satheesh Kumar, M.K., Ravi Krishna, R., Valsaraj, K.T., 2012. Atmospheric pollution in a semi-urban, coastal region in India following festival seasons. *Atmos. Environ.* 47, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.062>
- Noack, R., 2017. The Germans are determined to take all the fun out of fireworks, too. *Wash. Post*. https://www.washingtonpost.com/news/worldviews/wp/2017/12/29/europeans-would-breathe-a-lot-less-toxic-air-if-they-skipped-new-years-eve-fireworks/?utm_term=.4d18e3042a8b
- Perrino, C., Tiwari, S., Catrambone, M., Torre, S.D., Rantica, E., Canepari, S., 2011. Chemical characterization of atmospheric PM in Delhi, India, during different periods of the year including Diwali festival. *Atmospheric Pollut. Res.* 2, 418–427. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.048>
- Ray, A., 2018. The Chinese government is cracking down on fireworks [WWW Document]. *Quartz*. URL <https://qz.com/1208444/chinese-new-year-could-fizzle-with-chinas-ban-on-fireworks/>.
- Russel, M.S., 2009. *The Chemistry of Fireworks*, 2e édition. ed. Cambridge, Royal Society of Chemistry.
- Seidel, D.J., Birnbaum, A.N., 2015. Effects of Independence Day fireworks on atmospheric concentrations of fine particulate matter in the United States. *Atmos. Environ.* 115, 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.065>
- Shi, Y., Zhang, N., Gao, J., Li, X., Cai, Y., 2011. Effect of fireworks display on perchlorate in air aerosols during the Spring Festival. *Atmos. Environ.* 45, 1323–1327. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.056>
- Thakur, B., Chakraborty, S., Debsarkar, A., Chakrabarty, S., Srivastava, R.C., 2010. Air pollution from fireworks during festival of lights (Deepawali) in Howrah, India - a case study. *Atmósfera* 23, 347–365.
- Vecchi, R., Bernardoni, V., Cricchio, D., D'Alessandro, A., Fermo, P., Lucarelli, F., Nava, S., Piazzalunga, A., Valli, G., 2008. The impact of fireworks on airborne particles. *Atmos. Environ.* 42, 1121–1132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.047>
- Verma, C., Deshmukh, D.K., 2014. The ambient air and noise quality in India during diwali festival: A Review. *Recent Res. Sci. Technol.* 8.
- Wang, Y., Hopke, P.K., Rattigan, O.V., 2012. A new indicator of fireworks emissions in Rochester, New York. *Environ. Monit. Assess.* 184, 7293–7297. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2497-5>

- Wang, Y., Zhuang, G., Xu, C., An, Z., 2007. The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing. *Atmos. Environ.* 41, 417–431. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.043>
- Wilson, E.E., 2017. What's in fireworks, and what produces those colorful explosions? *American Chemical Society* 95, 24–25.
- Xu, Zheng, Nie, W., Chi, X., Huang, X., Zheng, L., Xu, Zhengning, Wang, J., Xie, Y., Qi, X., Wang, X., Xue, L., Ding, A., 2018. Ozone from fireworks: Chemical processes or measurement interference? *Sci. Total Environ.* 633, 1007–1011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.203>