

Conditions météorologiques et épisodes de pollution par les particules fines en Alsace

Weather conditions and particulate matter pollution peaks in Alsace

Raphaèle DEPROST,¹ Patrice PAUL,² Florent VASBIEN,³ Joseph KLEINPETER⁴

Résumé

Les épisodes de pollution aux particules sont engendrés par des émissions atmosphériques d'origine plus ou moins locale, régionale ou lointaine avec une contribution géographique déterminée par la genèse et l'évolution de situations météorologiques très différentes. L'article décrit trois types d'épisodes en Alsace et leur gestion par rapport aux arrêtés en vigueur. Le premier épisode, du 9 au 15 janvier 2009, est très représentatif des situations de pollutions locales prédominantes, où des inversions de températures défavorisent la dispersion des pollutions primaires issues du trafic routier et du chauffage dans la vallée encaissée du Rhin supérieur, entre Vosges et Forêt Noire. Des niveaux historiques ont été atteints durant cet épisode, avec déclenchement de la procédure d'alerte et de mesures d'urgence (réduction de vitesse de circulation). Le deuxième épisode, du 7 au 12 février 2010, est typique des situations hivernales d'apports transfrontaliers prédominants de masses d'air qui se sont chargées en particules, principalement à longue distance et parvenant jusqu'au Rhin supérieur. Enfin, l'épisode de pollution du 7 au 15 mars 2014 est caractéristique du début de printemps, avec des conditions météorologiques favorables à la combinaison chimique de l'ammoniac agricole avec les oxydes d'azote principalement issus du trafic routier, et formation secondaire de nitrate d'ammonium particulaire. Durant cet épisode, la procédure d'information et de recommandation a été déclenchée pendant 10 jours consécutifs. Dans tous les cas, la meilleure perspective est la réduction des particules au moment des pics, mais aussi tout au long de l'année, ce qui passe avant tout par la prescription et la planification réglementaires, associées à la sensibilisation des acteurs publics et privés jusqu'au citoyen.

Abstract

Particulate matter pollution peaks are generated by high atmospheric emissions with a more or less local, regional or long range origin, with a geographical contribution determined by the genesis or the evolution of different meteorological configurations. This paper describes three kinds of episodes occurring in Alsace and their management according to the current legislation. The first episode, from January 9th to January 15th 2009, is very representative of situations with dominant local pollution, when temperature inversions are unlikely to disperse the primary pollutions from road traffic or house heating in the Upper Rhine valley between the Vosges and the Black Forest. Historic levels were reached during this episode, with release of the alert procedure and establishment of emergency measures (reduction of traffic speed limit). The second episode, from February 7th to February 12th 2010, is typical of winter configurations with dominant transboundary imports of air masses that were charged with particulate matter mainly far from the Upper Rhine. Finally, the episode from March 7th to March 15th 2014, is representative of the early spring, with meteorological conditions favorable to the chemical combination of ammonia from agriculture with nitrogen oxides mainly from road traffic, creating secondary particulate ammonium nitrate. For this episode, the recommendation and information procedure has been activated during 10 consecutive days. In all cases, the best perspective is the particulate matter reduction, not only during peaks but throughout the year too, what involves regulatory prescription and planning, associated with raising awareness of the public and private actors down to the citizen level.

Mots-clés

Situation météorologique, flux de circulation et pollution transfrontalière, pic de pollution aux particules, pollution locale et pollution importée, modèle CHIMERE, prévision et scénarios par modélisation, seuils et procédures d'information et de recommandation et d'alerte, nitrate d'ammonium.

Keywords

Meteorological situation, circulation fluxes and transboundary pollution, particle pollution peak, local and imported pollution, CHIMERE model, forecasts and scenarios with models, information and recommendation and alert thresholds and procedures, ammonium nitrate.

Introduction

L'Alsace fait partie du fossé rhénan méridional, encadré par les reliefs des Vosges, de la Forêt Noire et du Jura. La disposition géographique de ce vaste espace naturel crée des conditions aérologiques spécifiques dans la basse troposphère, bien différentes de celles du Bassin parisien jusqu'à la Lorraine. Il en résulte des conditions plus favorables à la stagnation de l'air et des polluants. C'est la raison pour laquelle cette unité naturelle à forte densité de population et aux activités industrielles et de transport importantes a été le cadre d'un projet climatologique franco-germano-suisse dans les années 90, dénommé REKLIP, qui a contribué à mieux connaître les facteurs climatiques qui agissent sur la qualité de l'air et à développer une coopération transfrontalière de plus en plus active dans le suivi et la compréhension des processus agissant sur la pollution de l'air. L'objet de cet article est l'analyse et une meilleure connaissance des facteurs météorologiques conditionnant des pointes de concentration des PM_{10} en Alsace dans le cadre de trois épisodes caractéristiques.

Différents types de situations météorologiques favorables à des pics de pollution

Les épisodes de fortes concentrations de particules PM_{10} en Alsace sont engendrés par des missions atmosphériques d'origine plus ou moins locale, régionale ou lointaine avec une contribution géographique déterminée par la genèse et l'évolution de situations météorologiques très différentes. Les situations classiques d'hiver correspondent à des conditions anticycloniques persistant plusieurs jours avec des vents variables. Elles se traduisent par de fortes inversions de températures, généralement peu épaisses verti-

calement et renforcées par l'encadrement montagneux des Vosges et de la Forêt Noire, qui accentue la stagnation des masses d'air froides, liées à l'origine au déficit radiatif nocturne à la surface du sol. Il est fréquent que le brouillard et les stratus bas persistent plusieurs jours, alors que le soleil brille sur les hauteurs des Vosges et de la Forêt Noire, mais aussi en Lorraine ou, vers l'est, dans la haute vallée du Danube. L'épisode de pollution du 9 au 15 janvier 2009 est très représentatif de ce genre de situation.

D'autres situations météorologiques, très différentes et moins fréquentes, se caractérisent par une forte advection de masses d'air froid en provenance d'Europe centrale. Elles résultent d'une première période de blocage de la circulation générale pendant plusieurs jours avec un anticyclone froid stationnaire sur le Nord-Ouest de l'Europe favorable à l'accumulation de la pollution, et une dépression dynamique active sur la Méditerranée occidentale et l'Italie. Au moment du déblocage, la majorité des polluants constatés en Alsace proviennent alors de ces régions éloignées à forte densité de population d'Europe centrale.

Enfin, les conditions anticycloniques de printemps, avec un rayonnement solaire plus durable et plus long, peuvent déclencher des pics de pollution en lien avec des émissions particulières de précurseurs de particules secondaires, malgré de faibles inversions thermiques, situées à des altitudes plus élevées, de l'ordre de 1 000 à 2 000 mètres. Parfois, elles se forment au sein de masses d'air stables et subsidentes.

Toutes ces situations favorables à des pics de pollution se terminent généralement rapidement, soit par la mise en place de régimes perturbés, qui apportent des précipitations et du vent, soit par l'apparition de vents plus forts, même si les conditions anticycloniques persistent. Les caractéristiques et les différenciations de ces types de situations méritent une analyse détaillée dans le

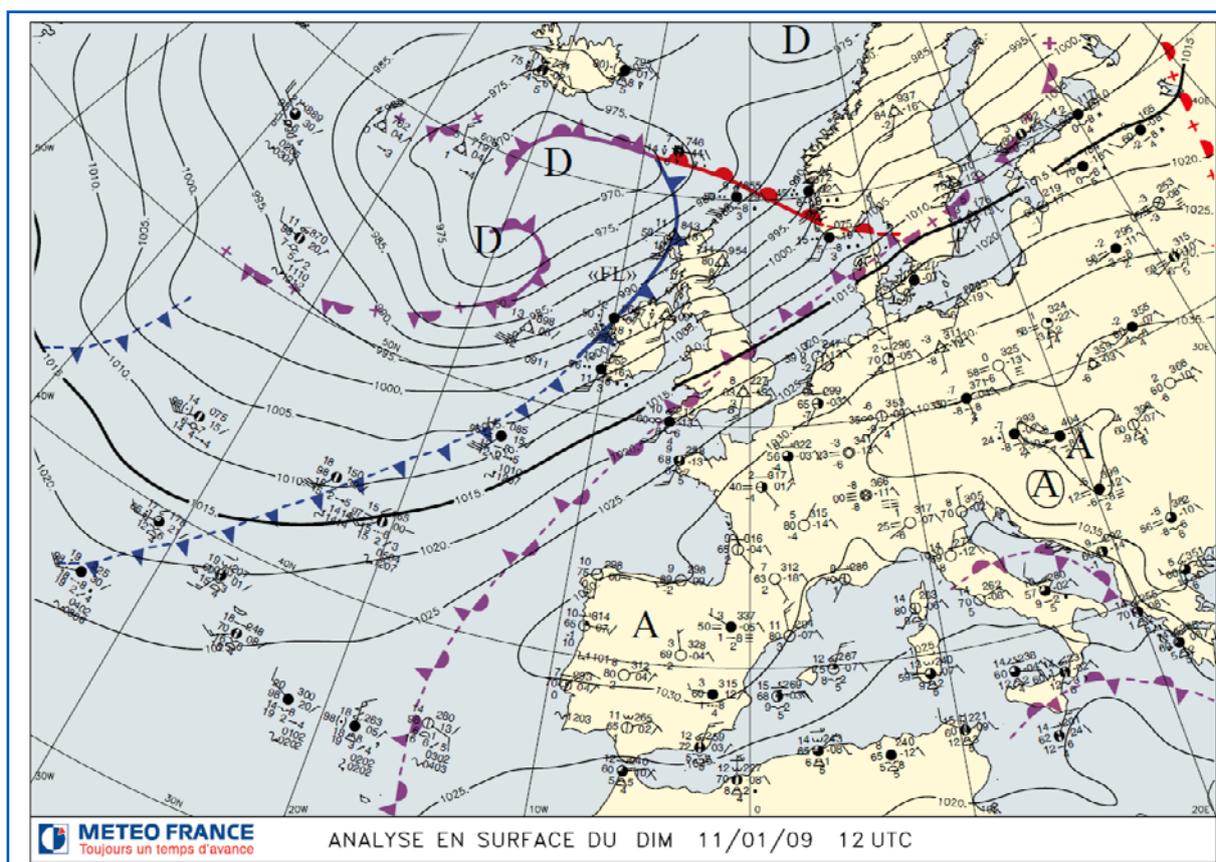


Figure 1

Situation météorologique synoptique du 11 janvier 2009 à 12h UTC (source : Météo-France).
 Synoptic weather situation, 11 January 2009, 1200 GMT.

cadre topographique et géographique spécifique du fossé rhénan méridional.

Épisode anticyclonique du 9 au 15 janvier 2009

L'épisode de janvier 2009 a été caractérisé par une dispersion très difficile des polluants émis localement dans le Bas-Rhin, tandis que dans le Haut-Rhin, à proximité de Mulhouse et de Bâle, les concentrations de PM₁₀ n'ont guère dépassé le seuil de recommandation.

La situation météorologique du 9 au 13 janvier (figure 1) est caractérisée par une vaste zone anticyclonique stationnaire, qui s'étend de l'Espagne, à la France jusqu'en Europe orientale et rejette plus au nord le flux perturbé d'ouest qui dirige des masses d'air océanique doux sur les Iles Britanniques et la Scandinavie. De l'air très froid stagne dans les basses couches (minima de -10 à -15 °C), surmonté par une atmosphère réchauffée et asséchée par une forte subsidence : le radiosondage de Stuttgart du 11 jan-

vier à 12h UTC (figure 2) montre bien le maintien d'une couche mince, froide et très stable thermique (-9 °C), surmontée par une forte inversion de température, comportant des températures atteignant 2 à 3 °C entre 800 et 1 500 mètres d'altitude.

Une analyse fine des conditions météorologiques en Alsace révèle des températures largement négatives entre le 9 et le 12 janvier (minima de -10 à -15 °C, maxima de -6 à -2 °C dans le Bas-Rhin), avec du brouillard givrant qui se lève localement, tard en début d'après-midi et des vents variables et faibles. Toutefois, le 12 janvier, le vent de sud-ouest, qui s'établit modérément au-dessus de la couche, permet une dispersion plus précoce du brouillard et des stratus. Dans le Sud de l'Alsace, un vent sensible de secteur sud apparaît aux stations de Colmar et de Mulhouse-Bâle. Cette tendance s'accroît le 13 janvier, alors que le vent demeure très faible dans le Bas-Rhin : la couche d'air froid proche du sol demeure découplée de la circulation générale d'altitude, qui s'oriente à l'ouest-sud-ouest,

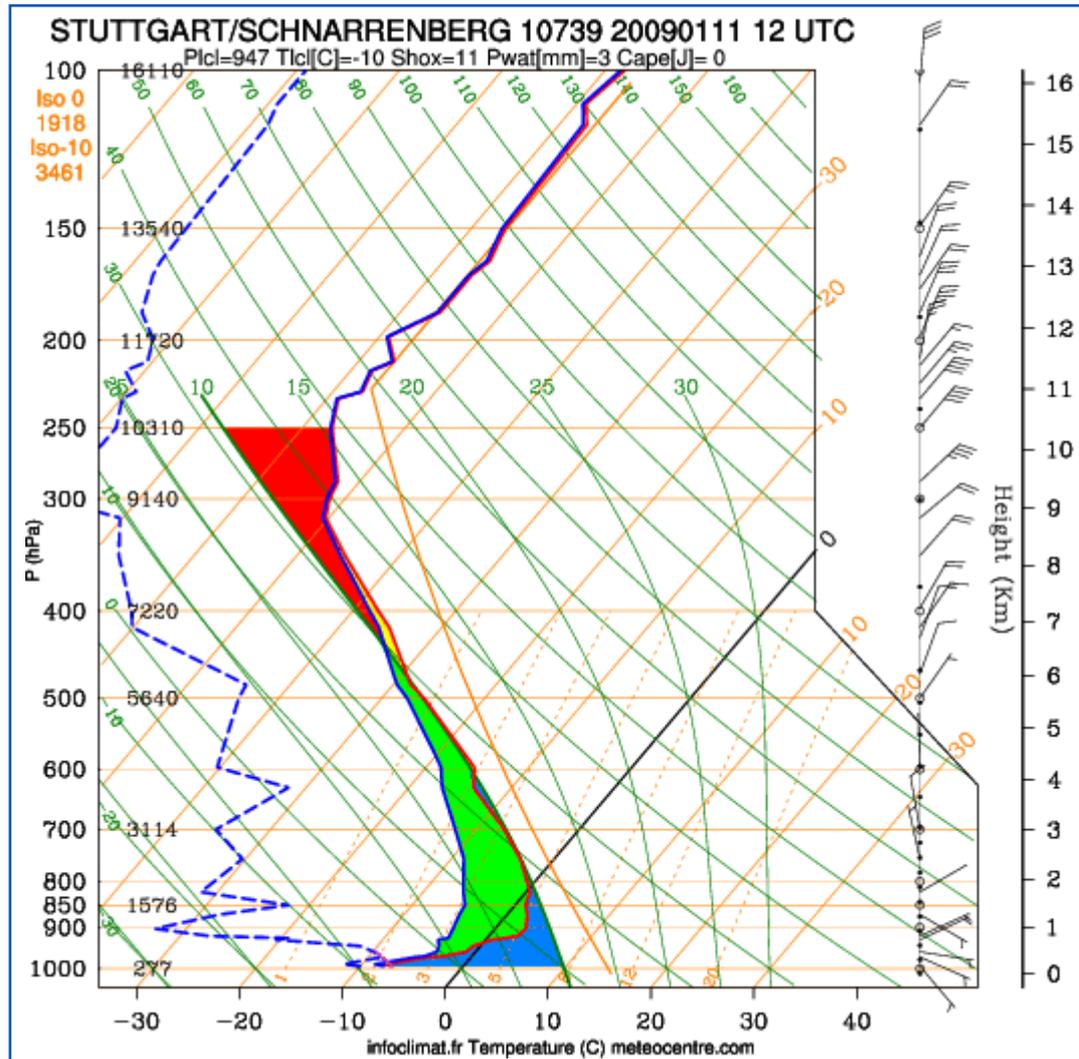


Figure 2

Radiosondage de Stuttgart du 11 janvier 2009 à 12h UTC (source : Centre Météo UQAM).
 Radiosonde investigation in Stuttgart, 11 January 2009, 1200 GMT.

comme le montrent bien les radiosondages de Stuttgart et d'Idar-Oberstein (Palatinat) le 13 à 0h et 12h UTC, non représentés dans cet article. Vers la fin de la nuit du 13 au 14 janvier, les conditions météorologiques deviennent favorables à la dispersion des polluants, avec le passage d'un front qui apporte de la pluie verglaçante et un peu de neige, ainsi qu'une meilleure ventilation des basses couches.

Épisode du 7 au 12 février 2010 avec advection de masses d'air venant de l'est.

Le 7 février, des conditions anticycloniques, établies du Nord de la France à la Pologne, sont favorables à l'établissement de masses d'air

stables, qui s'effacent le 9 février en relation avec le développement d'une dépression sur la Méditerranée occidentale qui dirige un flux rapide de secteur est sur le Nord-Est de la France.

La carte synoptique (figure 3) montre bien que les masses d'air provenant du Sud de la Pologne se déplacent de plus en plus rapidement sous l'effet du renforcement du gradient de pression sur l'Allemagne, les 10 et le 11 février (figure 4).

Le temps en Alsace est couvert avec de faibles chutes de neige, avec un vent vif de nord à nord-est, canalisé selon l'axe du fossé rhénan, tandis que sur la figure 5, le radiosondage de Stuttgart le 12 à 12h UTC indique un flux fort à composante est dans la moyenne troposphère et une atmosphère plutôt instable.

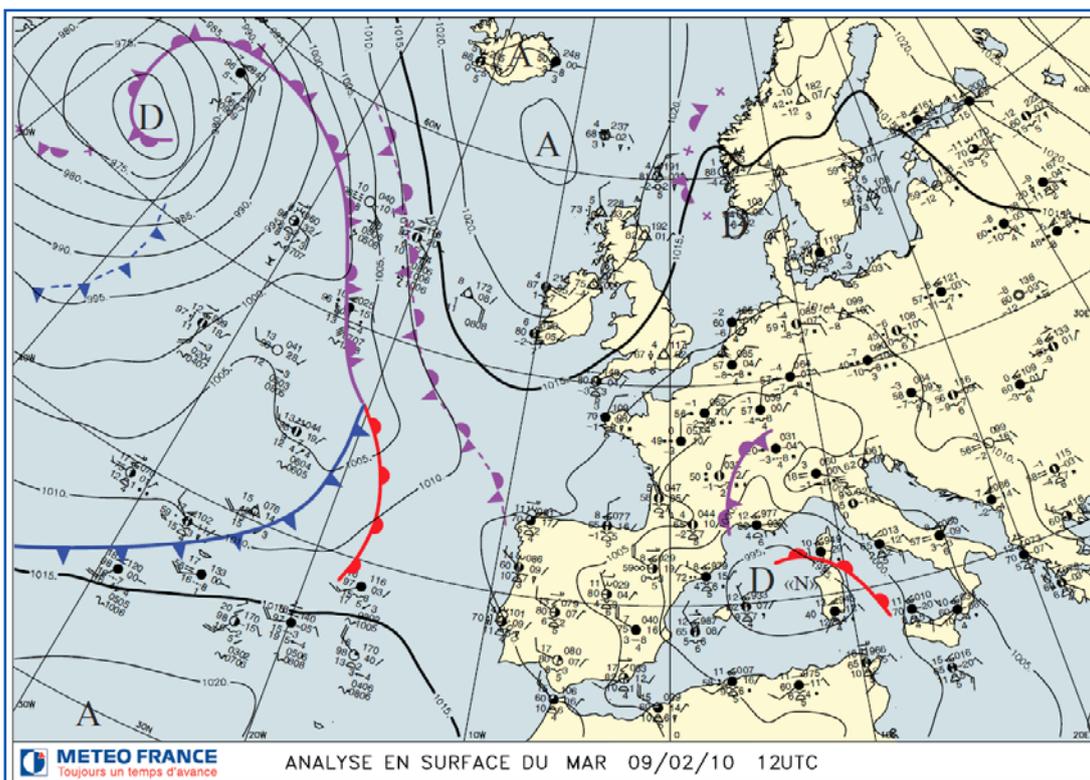


Figure 3

Situation météorologique synoptique du 9 février 2010 à 12h UTC (source : Météo-France).
Synoptic weather situation, 9 February 2010, 1200 GMT.

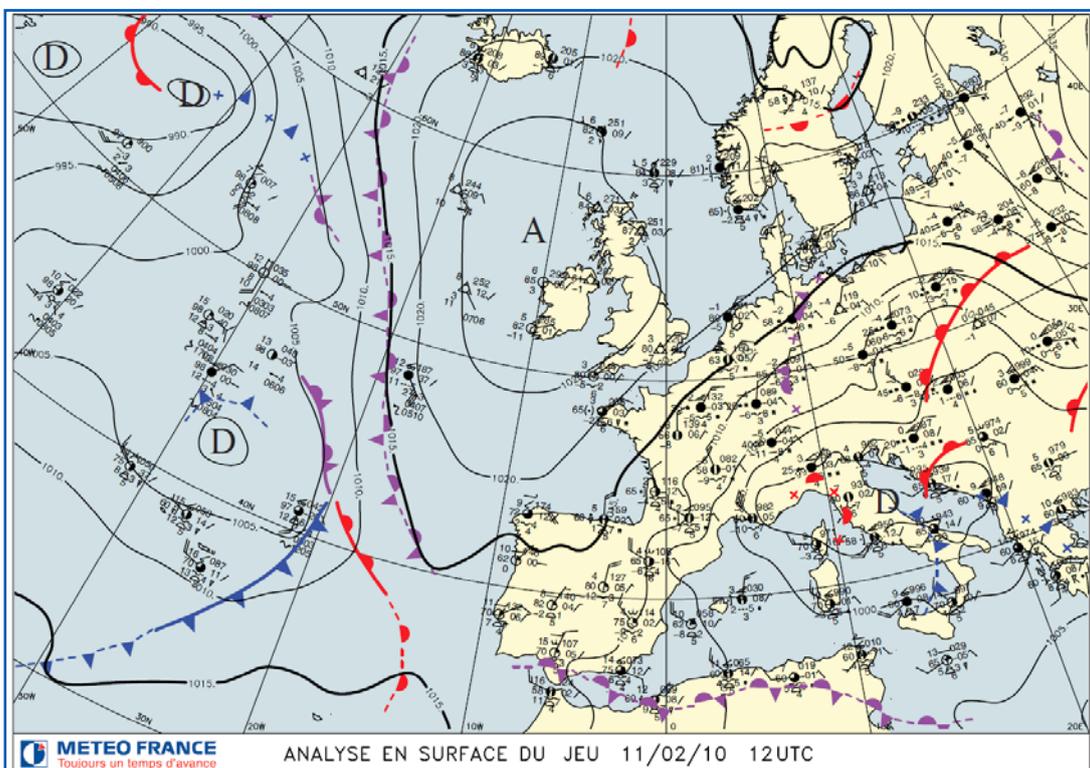


Figure 4

Situation météorologique synoptique du 11 février 2010 à 12h UTC (source : Météo-France).
Synoptic weather situation, 11 February 2010, 1200 GMT.

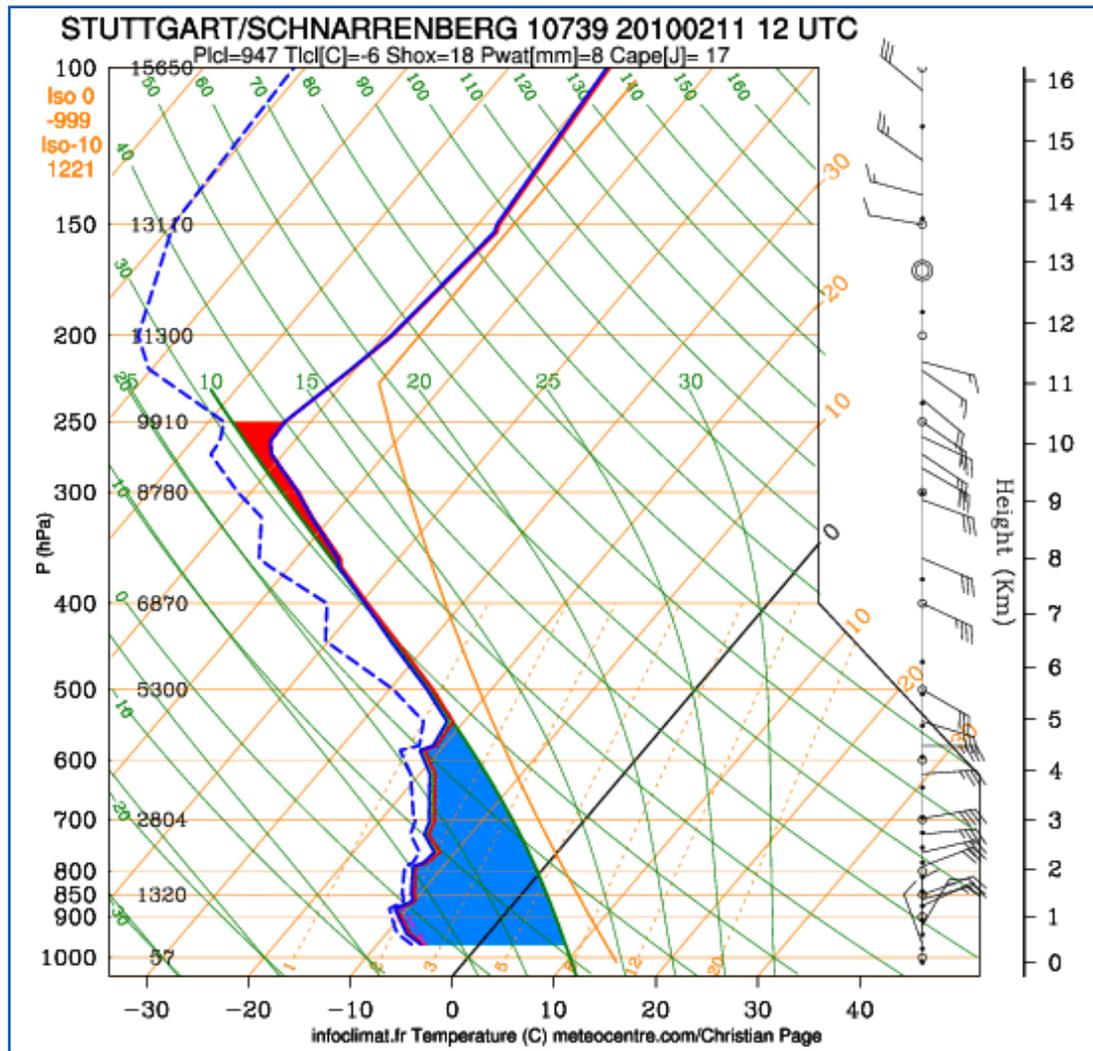


Figure 5

Radiosondage de Stuttgart du 11 février 2010 à 12h UTC (source : Centre Météo UQAM).
[Radiosonde investigation in Stuttgart, 12 February 2010, 1200 GMT.](#)

Il apparaît ainsi clairement que les fortes valeurs de concentration des PM_{10} des 12 et 13 février en Alsace sont principalement d'origine transfrontalière.

Épisode de beau temps de début de printemps (7 au 15 mars 2014)

L'épisode du 7 au 15 mars 2014 a été caractérisé par une longue période anticyclonique très ensoleillée, durant laquelle une atmosphère très brumeuse (5 à 10 km) a persisté presque sans discontinuité (brume sèche). Une inversion thermique de subsidence, qui était le plus souvent située à une altitude comprise entre 1 000 et 1 500 m a été favorable à une concentration plus modérée des particules qu'en janvier 2009. Une

vaste zone de hautes pressions s'étend depuis le 6 mars de l'Espagne à la Pologne et au-delà, et bloque sur les Iles Britanniques la progression vers l'est des perturbations atlantiques. Les vents sont faibles en Alsace avec une direction orientée au nord-est et des masses d'air stables dans la basse troposphère.

La figure 6 montre, le 10 mars, l'apparition d'un second anticyclone centré sur l'Irlande, qui renforce le flux de nord-est à est. Celui-ci apparaît remarquablement bien sur la carte synoptique détaillée du 11 mars pour l'Europe centrale du Berliner Wetterkarte. Cette configuration du champ de pression peut favoriser des apports de polluants venant de l'est, ce qui est confirmé par les rétrotrajectoires.

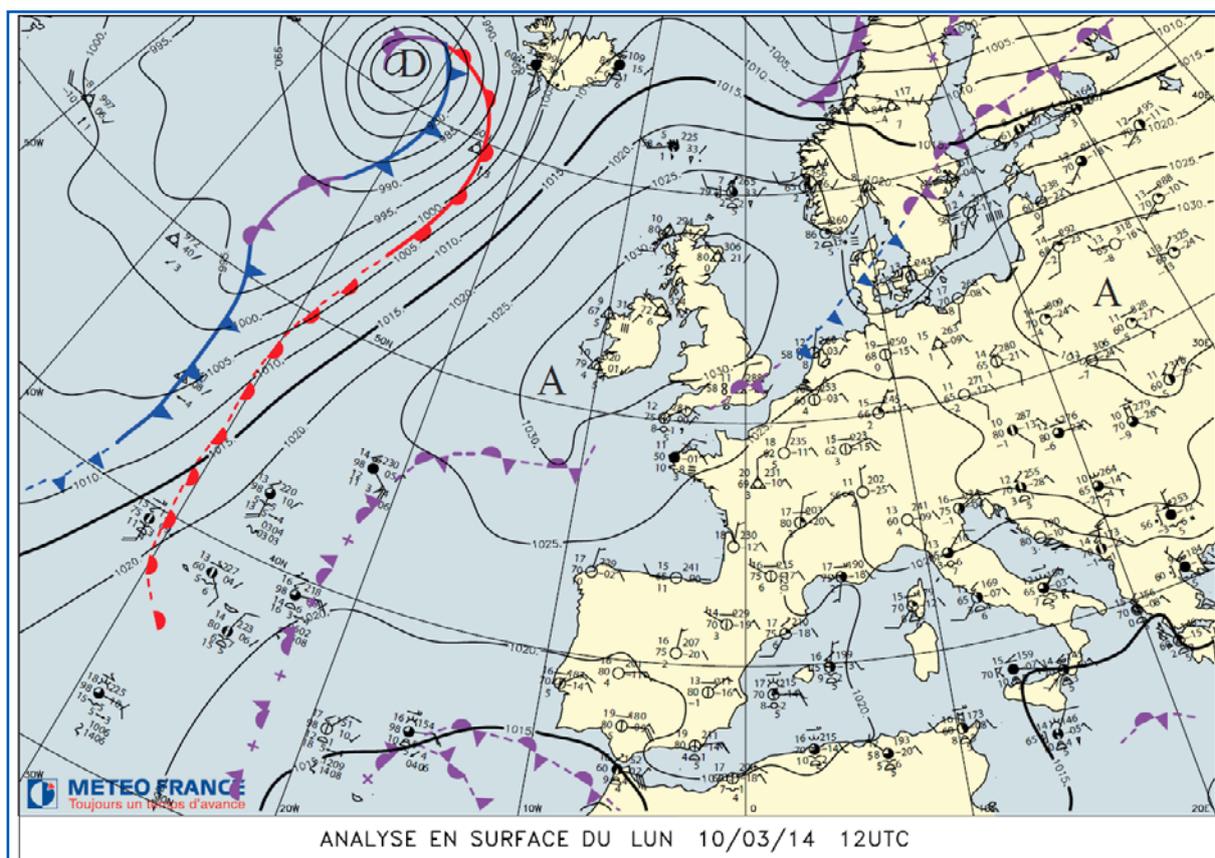


Figure 6

Situation météorologique synoptique du 10 mars 2014 à 12h UTC (source : Centre Météo UQAM/ Météo-France.

Synoptic weather situation, 10 March 2014, 1200 GMT.

Enfin, l'exemple du radiosondage de Stuttgart du 10 mars à 0h (figure 7) confirme bien que l'inversion de rayonnement près du sol est quasi inexistante, à cause de l'effet du vent synoptique, tandis que la basse troposphère apparaît très stable jusqu'au niveau 850 hPa (vers 1 500 m). Les derniers jours de l'épisode, à partir du 12 mars, sont caractérisés par un retour à un gradient de pression quasi nul, qui engendre des vents variables et faibles, favorables à la concentration de PM_{10} d'origine locale. Le 15 mars, l'arrivée d'un flux de nord-ouest, rapide et turbulent, marque la fin de l'épisode de pollution.

Origine des particules PM_{10} durant les trois pics de pollution

Émises localement, formées à partir d'autres composés ou encore importées, les particules PM_{10} constituent une pollution complexe car d'origine multiple.

Les particules PM_{10} sont émises directement (particules primaires) par des activités anthropiques telles que le trafic routier (camions et voitures Diesel), les installations de chauffage (charbon, fioul, bois), l'industrie et l'agriculture, mais également par des phénomènes naturels ou physiques tels que l'érosion ou la resuspension par le vent ou la turbulence liée au trafic routier. En Alsace et durant l'hiver, le trafic routier (resuspension comprise) et le chauffage sont les principaux émetteurs anthropiques de particules PM_{10} (figure 8), alors que l'agriculture est peu émettrice de particules primaires à cette saison.

Les particules PM_{10} peuvent également se former dans l'atmosphère par des phénomènes microphysiques ou par des réactions chimiques à partir d'autres composés émis (c'est le cas du nitrate d'ammonium), il s'agit alors de particules secondaires. Enfin, des PM_{10} primaires ou secondaires, issues de sources anthropiques ou naturelles, peuvent être importées de régions voisines ou plus lointaines.

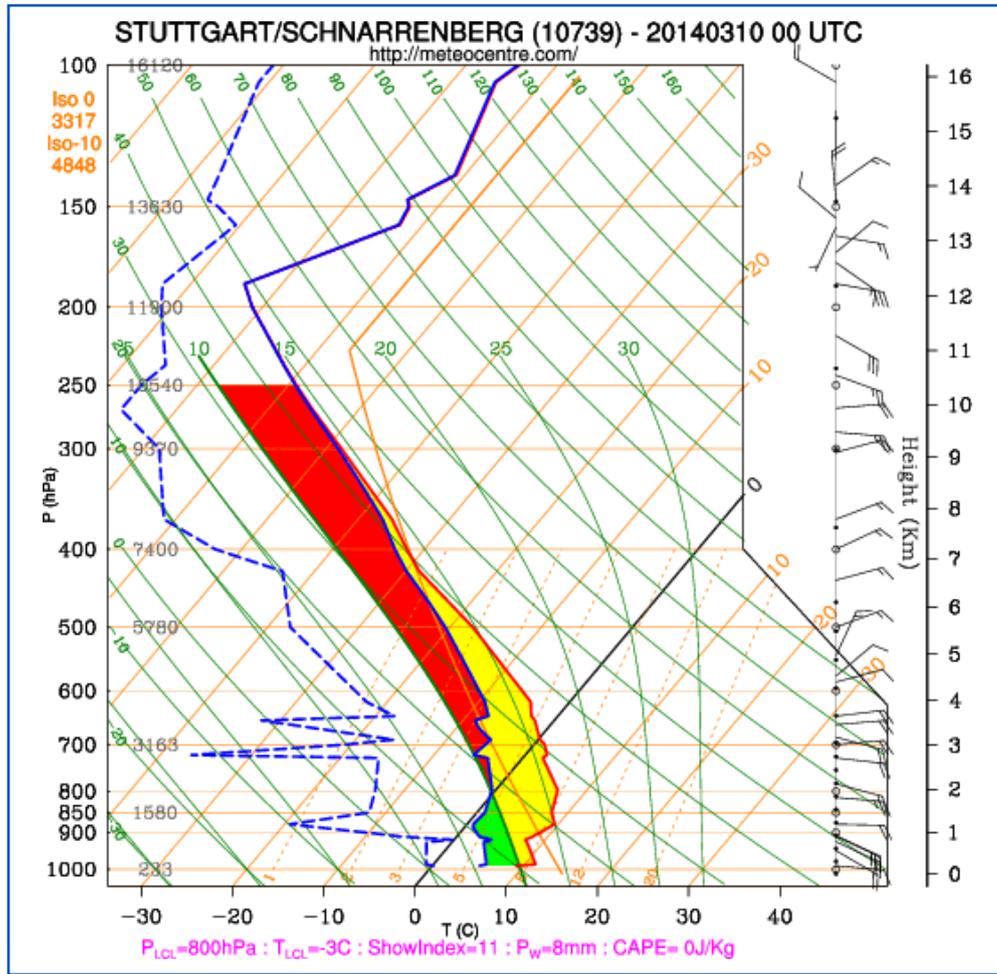


Figure 7

Radiosondage de Stuttgart du 10 mars 2014 à 12h UTC (source : Centre Météo UQAM).
 Radiosonde investigation in Stuttgart, 10 March 2014, 1200 GMT.

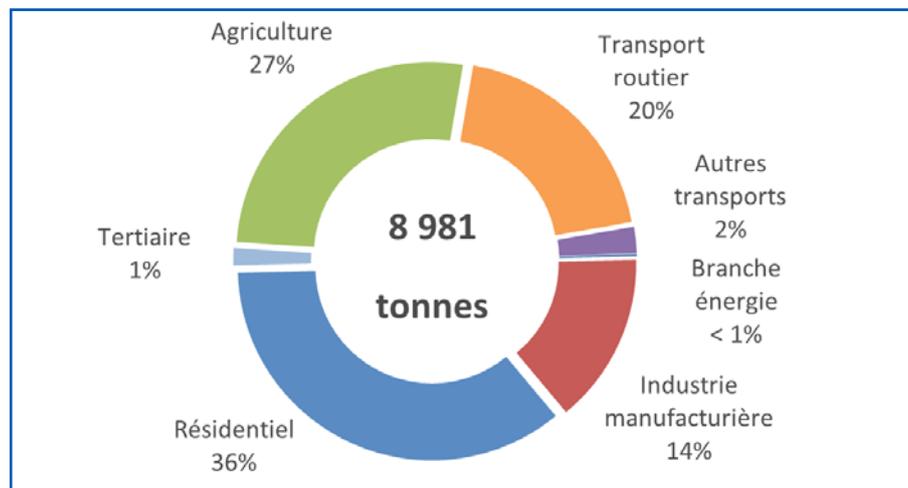


Figure 8

Répartition des émissions annuelles de particules PM₁₀ en Alsace par secteur pour l'année 2012.
 Distribution of annual PM₁₀ emissions for each sector in Alsace for 2012.

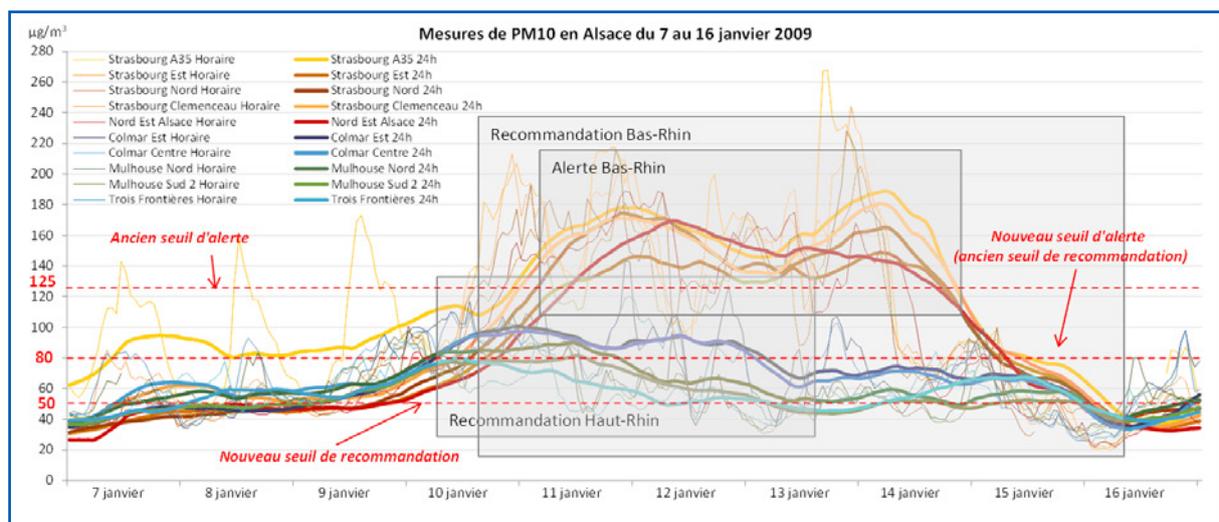


Figure 9

Mesures de PM_{10} en Alsace du 7 au 16 janvier 2009, en moyennes horaires et moyennes glissantes sur 24 h.

PM_{10} measurements in Alsace from 7 to 14 January 2009, hourly averages and moving averages over 24 hours.

Les conditions météorologiques régissent le transport des masses d'air, la dispersion et le lessivage, mais aussi les émissions (davantage d'émissions liées au chauffage ou aux moteurs froids lorsque les températures baissent) et les réactions chimiques (formation photochimique du nitrate d'ammonium). La météorologie agit donc de façon multiple sur les concentrations de particules PM_{10} , et peut donc aussi bien provoquer ou accentuer les épisodes de pollution que permettre de les résorber.

Pour pouvoir prendre en compte tous ces phénomènes à l'échelle régionale, l'ASPA met en œuvre deux outils de simulation : le modèle de météorologie WRF et le modèle de chimie-transport CHIMERE, qui permettent de simuler ou prévoir la qualité de l'air de façon spatialisée.

Épisode du 9 au 15 janvier 2009 : pollution locale et niveaux historiques

Description de l'épisode en lien avec la météorologie

Le 9 janvier 2009, dans les premières couches de l'atmosphère, sous l'inversion de température, les concentrations de particules poursuivent la hausse amorcée les jours précédents avec dépassement de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3/24\text{h}$, seuil actuel d'information de la population en vigueur depuis février 2012 (figure 9).

Le 10 janvier, alors que les niveaux continuent de monter rapidement dans le Bas-Rhin, les niveaux dans le Haut-Rhin se stabilisent avec franchissement néanmoins pendant plusieurs jours du seuil d'alerte actuel. Dans la journée du 12 janvier, le vent de sud-ouest en altitude permet aux niveaux de baisser sensiblement dans le Bas-Rhin, sans toutefois les laisser passer en dessous du seuil d'alerte actuel de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3/24\text{h}$ (figure 10).

Les niveaux remontent les 13 et 14 janvier, lorsque la couche près du sol se découple de la circulation d'altitude. Pendant ce temps, sous le vent sensible, doucement les niveaux baissent dans le Haut-Rhin. Dans l'après-midi du 14 janvier, avec le passage du front, l'épisode se résorbe. Le 15 janvier, les niveaux repassent en dessous du seuil d'alerte, et le 16 janvier en dessous du seuil d'information actuel.

Au bilan, des niveaux historiques de particules ont été atteints lors de cet épisode, avec le 14 janvier à Strasbourg $189 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24h en proximité du trafic et $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24h en fond urbain. Toute l'Alsace du Nord a été également soumise à des niveaux de pollution élevés : jusqu'à $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24h au maximum à Nord-Est Alsace.

Origine des particules durant l'épisode

Les scénarios modélisés (figures 11 et 12)

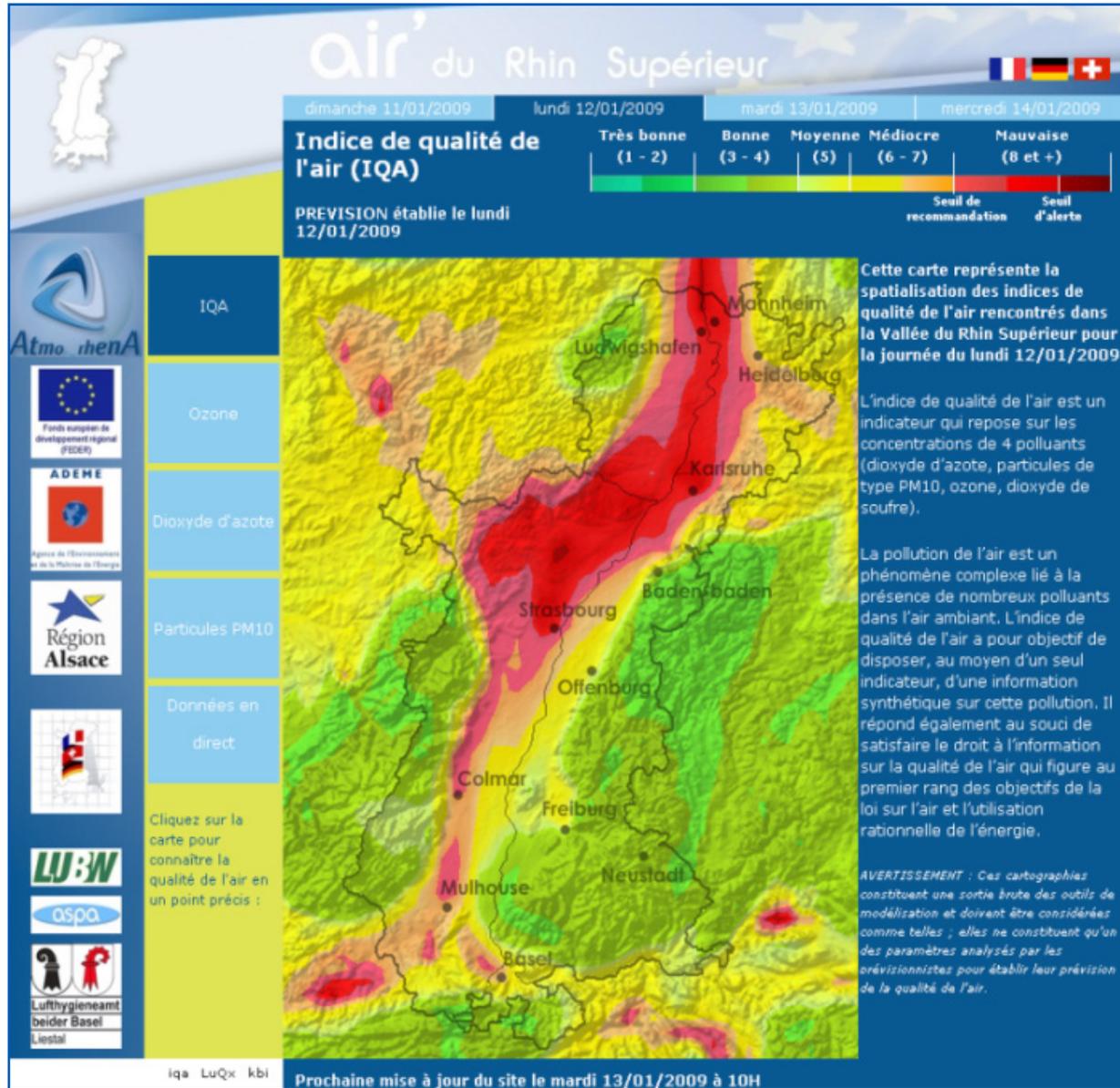


Figure 10

Carte de prévision régionale diffusée le lundi 12 janvier 2009 sur le site Internet de l'ASPA, avec seuils de recommandation et d'alerte, conformément à l'arrêté préfectoral du 9 juin 2004.
 Regional forecast map broadcasted on Monday, 12 January 2009 on the ASPA Internet website, according to recommendation and alert thresholds of the prefectural decree of 9 June 2004.

montrent que pendant les journées du 9 au 15 janvier 2009, qui ont présenté des niveaux de concentrations supérieurs au seuil d'information, la contribution des émissions atmosphériques alsaciennes aux concentrations observées était comprise entre 60 % et 80 % dans les agglomérations de Strasbourg, Mulhouse, Colmar, ainsi que dans d'autres villes en plaine d'Alsace (Saverne, Molsheim, Sélestat, Ribeauvillé, Guebwiller, Thann ou Altkirch). Dans le reste de la plaine, cette contribution s'échelonnait de 20

à 60 %. Seules les limites de la région et les sommets vosgiens étaient faiblement influencés par les émissions alsaciennes et davantage par les imports de particules des régions voisines comme la Rhénanie Palatinat ou le Bade-Wurtemberg.

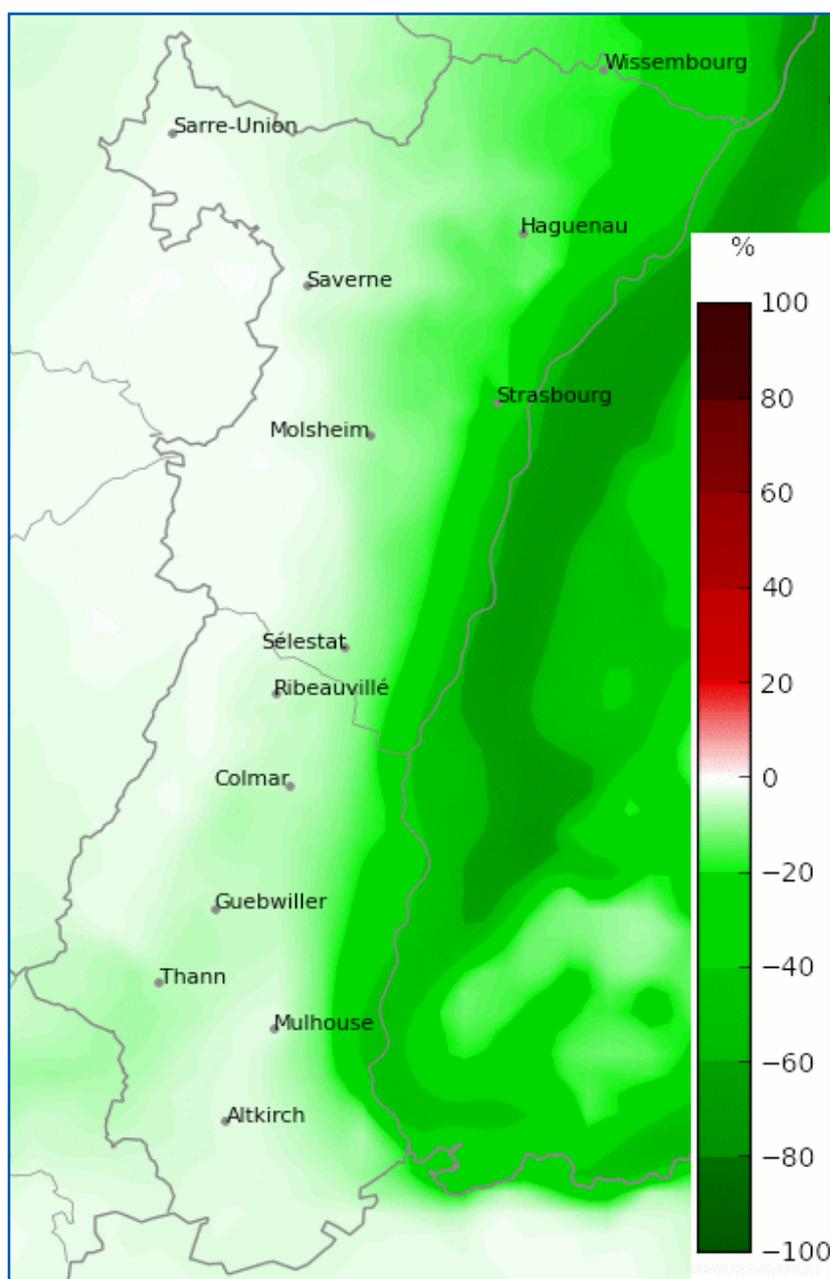


Figure 11

Carte des pourcentages de particules PM_{10} provenant des émissions anthropiques alsaciennes, obtenues avec CHIMERE par la méthode de coupure.

Map presenting the share of PM_{10} from Alsatian anthropogenic origin in percentage, obtained with CHIMERE with the zero method.

Épisode du 7 au 12 février 2010 : une pollution importée

Description de l'épisode en lien avec la météorologie

À partir du 7 février 2010, à la faveur des conditions anticycloniques, les niveaux de particules augmentent progressivement en plaine

d'Alsace (figure 13).

Le 8 février 2010 au soir, dans le Haut-Rhin (Sud de la région), les concentrations de PM_{10} dépassent le seuil 24h de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, alors qu'elles restent inférieures à cette valeur dans le Bas-Rhin. L'installation alors d'un régime de vent soutenu aurait pu permettre une dispersion de la pollution accumulée. Mais après une courte

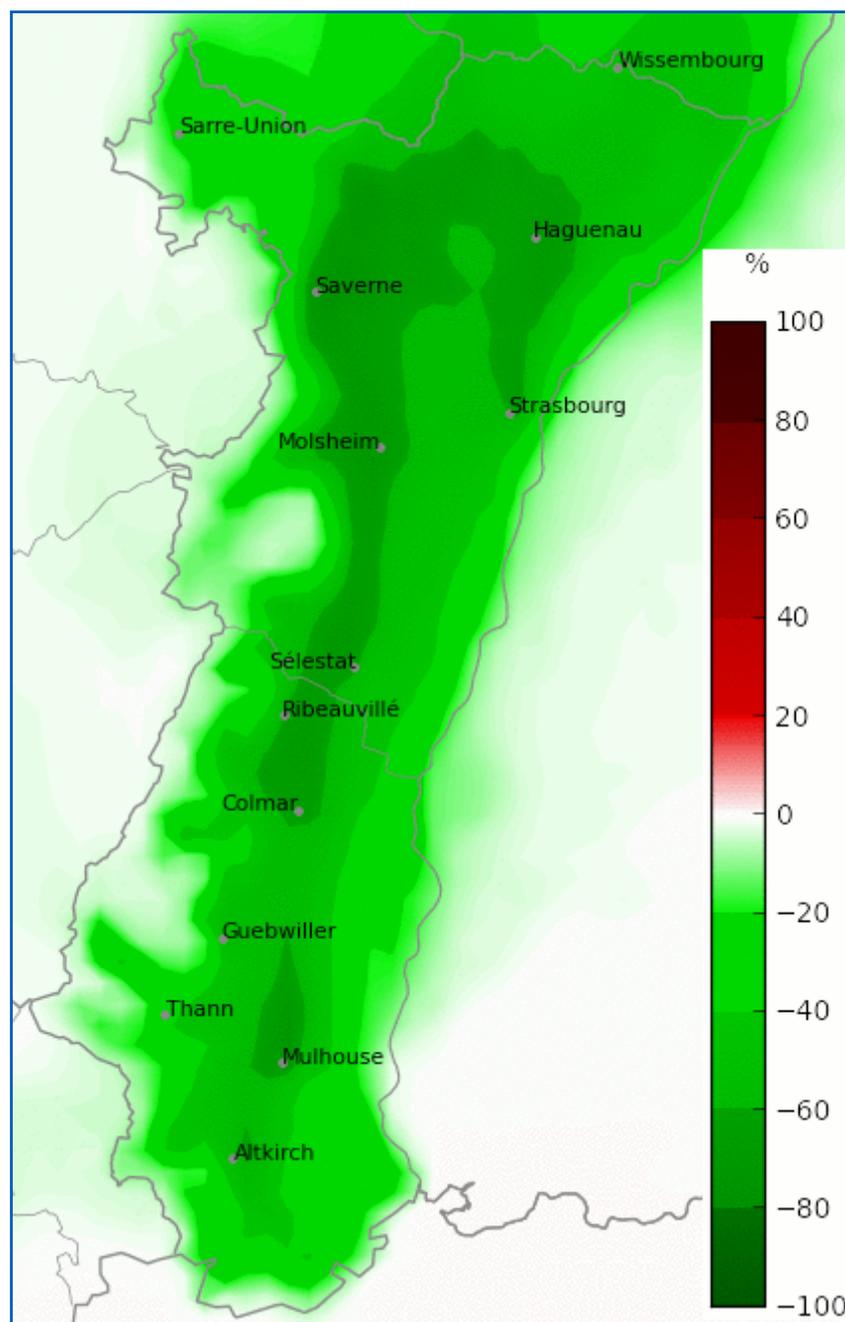


Figure 12

Carte des pourcentages de particules PM_{10} provenant des émissions anthropiques allemandes, obtenues avec CHIMERE par la méthode de coupure.

Map presenting the share of PM_{10} from German anthropogenic origin in percentage, obtained with CHIMERE with the zero method.

baisse en fin de matinée du 10 février dans toute la région, les niveaux augmentent partout l'après-midi du 10 février.

Le 11 février 2010, un premier pic de concentrations de PM_{10} est observé au Nord de l'Alsace puis à Strasbourg. Quelques heures plus tard, un pic similaire est relevé dans le Sud de la région,

à Colmar puis Mulhouse, la masse d'air ayant été poussée par le vent vif le long du fossé rhénan. Ce pic est résorbé immédiatement avant midi dans le Nord de la région et en début d'après-midi dans le Sud, révélant la fin de la traversée du fossé rhénan du nord au sud par une masse d'air chargée en particules.

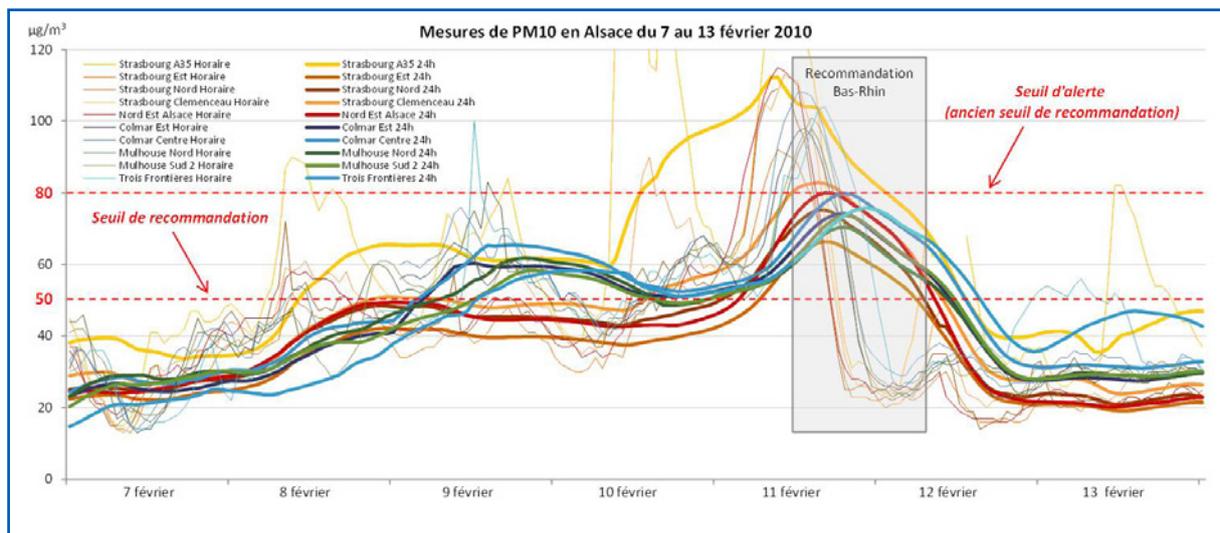


Figure 13

Mesures de PM₁₀ en Alsace du 7 au 13 février 2010, en moyennes horaires et moyennes glissantes sur 24h.

PM₁₀ measurements in Alsace from 7 to 13 February 2010, hourly averages and moving averages over 24 hours.

Origine des particules durant l'épisode

Les cartes de mesures de particules PM10 interpolées spatialement sur l'Allemagne pour les 8, 9, 10 et 11 février 2010 (figure 14) font apparaître clairement la masse d'air chargée en particules PM10 qui se déplace d'est en ouest puis vers le sud. Pour cet épisode, il est donc davantage question d'origine géographique dominante des particules PM10, que d'émissions locales ou de composés secondaires formés localement.

Épisode du 7 au 15 mars 2014 : le cas printanier

Description de l'épisode en lien avec la météorologie

À partir du 6 mars 2014, à la faveur des conditions anticycloniques ensoleillées, les moyennes de PM10 augmentent linéairement pour atteindre le seuil d'information (50 µg/m³) d'abord dans le Bas-Rhin puis dans le Haut-Rhin (figure 15).

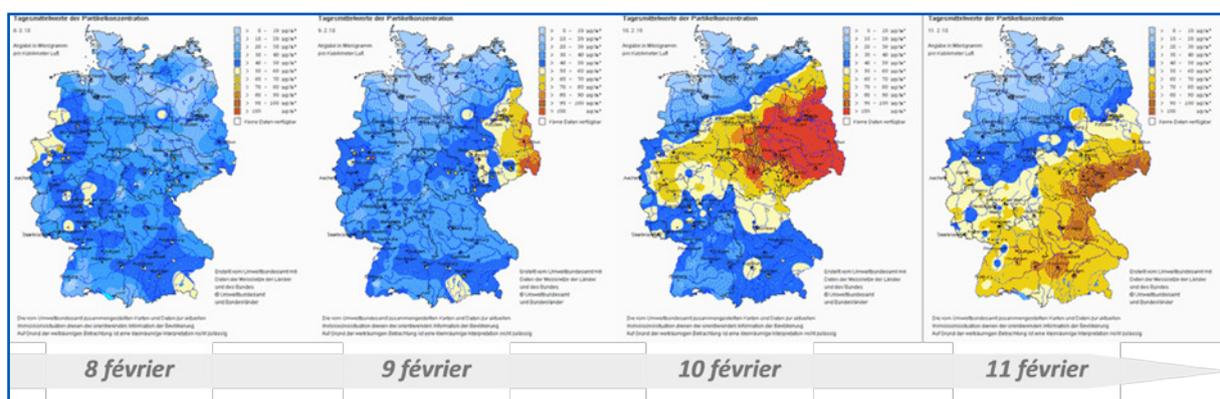


Figure 14

Cartes des mesures de particules PM10 interpolées spatialement sur l'Allemagne pour les 8, 9, 10 et 11 février 2010 (source : Umweltbundesamt).

Geographically interpolated map of PM10 measurements over Germany for the 8, 9, 10 and 11 February 2010, provided by the Umweltbundesamt.

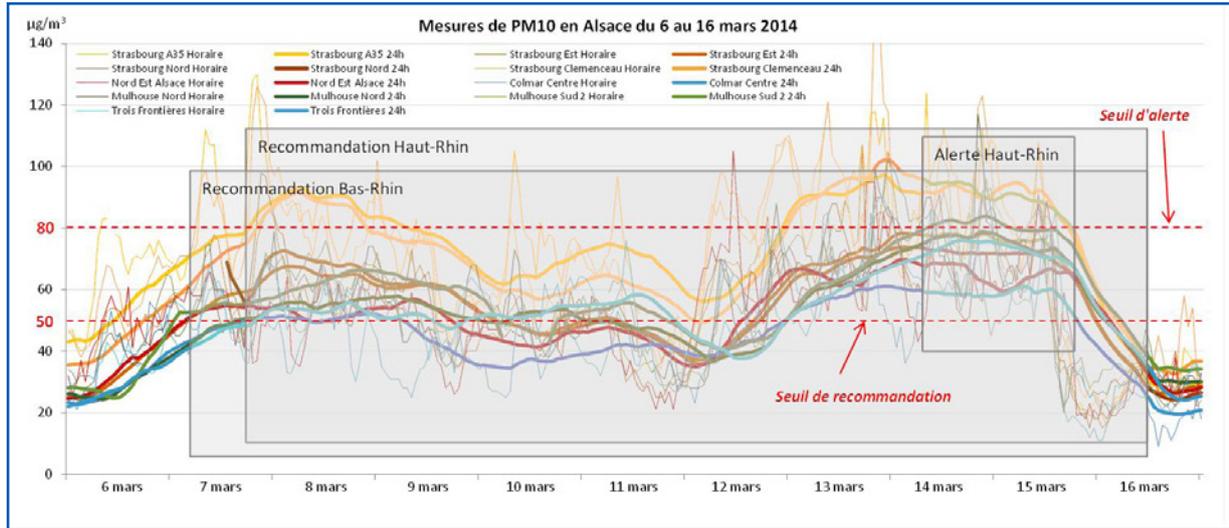


Figure 15

Mesures de PM10 en Alsace du 6 au 16 mars 2014, en moyennes horaires et moyennes glissantes sur 24h.

PM10 measurements in Alsace from 6th to 16th March 2014, hourly average and moving averages over 24 hours.

Puis les niveaux continuent d'augmenter, et le seuil d'alerte ($80\mu\text{g}/\text{m}^3/24\text{h}$) est largement dépassé dans le Bas-Rhin aux abords de routes à trafic intense. Les 10 et 11 mars, la configuration du champ de pression est propice à des apports de masses d'air de l'est, visiblement moins chargées en particules.

En revanche, du 13 au 15 mars, le gradient de pression quasi nul entraîne une stagnation de la masse d'air avec accumulation des particules émises localement : le seuil d'alerte est à nouveau dépassé en proximité du trafic dans le Bas-Rhin et est presque atteint en situation de fond et sur le Haut-Rhin. Le 15 mars, l'épisode de pollution se résorbe grâce à l'arrivée de conditions

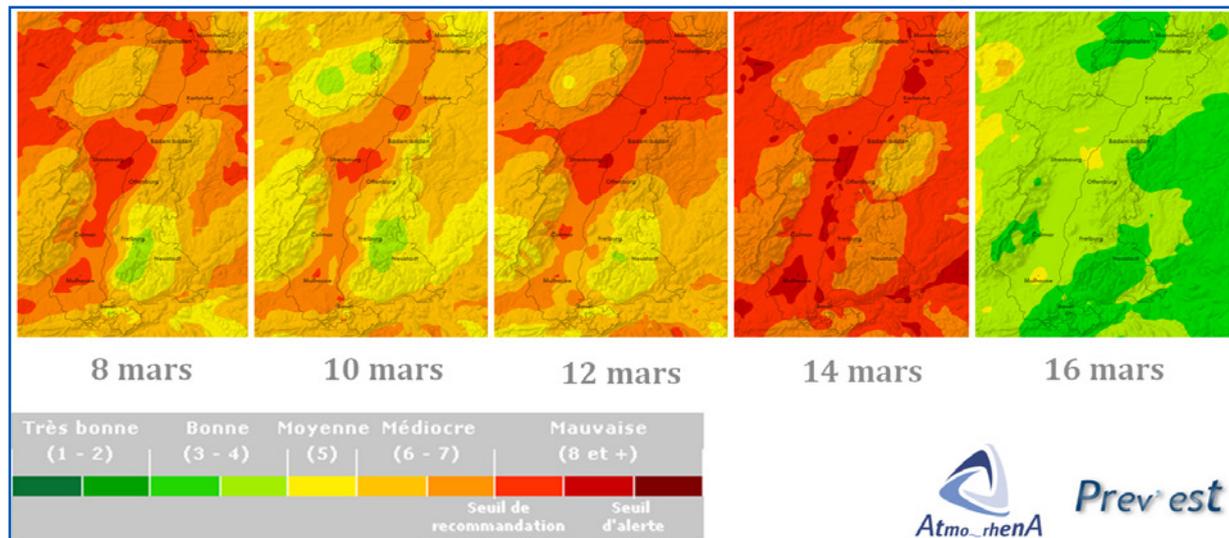


Figure 16

Cartes de prévision régionale diffusées du 8 au 16 mars 2014 sur le site Internet de l'ASPA, avec seuils de recommandation et d'alerte, conformément à l'arrêté préfectoral du 9 juin 2004 modifié le 1^{er} février 2012.

Regional forecast map broadcasted from the 8 to the 16 March 2014 on the ASPA Internet website, according to recommendation and alert thresholds of the prefectural decree of 9 June 2004 modified the 1st February 2012.

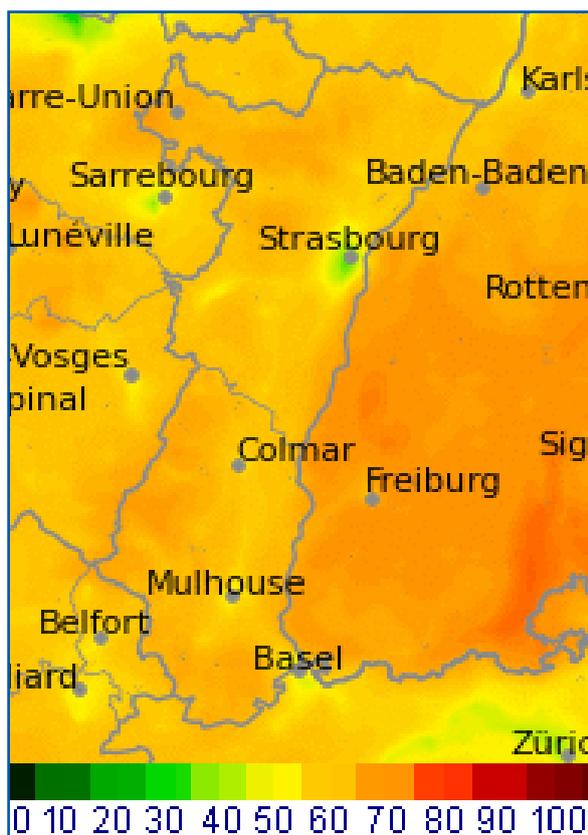


Figure 17

Part (en %) du nitrate d'ammonium dans les concentrations en PM₁₀ calculée par PREVEST en mars 2014

Share of ammonium nitrate in PM₁₀ concentrations in %, simulated by PREVEST in March 2014

météorologiques propices à la dispersion des particules dans l'atmosphère (figure 16).

Origine des particules durant l'épisode

Dans le cas de cet épisode printanier, du 7 au 16 mars 2014, la part du nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) dans les particules PM₁₀ a pu dépasser 50 % (figure 17).

Ces particules se sont formées dans l'atmosphère (particules secondaires) à partir de la combinaison d'ammoniac (d'origine agricole) et d'oxydes d'azote (majoritairement issus du trafic routier), sous l'action du rayonnement solaire (photochimie). Ce nitrate d'ammonium a été pour partie produit localement (à partir de précurseurs locaux ou importés), et pour partie importé de régions voisines.

Pour la journée du 14 mars qui a présenté les niveaux de concentrations les plus élevés, la contribution des émissions alsaciennes aux concentrations observées a été d'environ 60 % (figure 18). Les 40 % restants ont été importés ou formés à partir de précurseurs importés.

Gestion

La directive européenne relative à la qualité de l'air et Un Air pur pour l'Europe mettent l'accent sur la surveillance et la gestion des particules qui, avec l'ozone l'été, représentent le principal enjeu sanitaire lié à la pollution atmosphérique. Des valeurs limites annuelles et journalières transposées en droit français permettent de gérer le fond permanent, et des valeurs seuils pour l'ozone, complétées en droit français par des valeurs seuils pour les particules PM₁₀ réglementent la

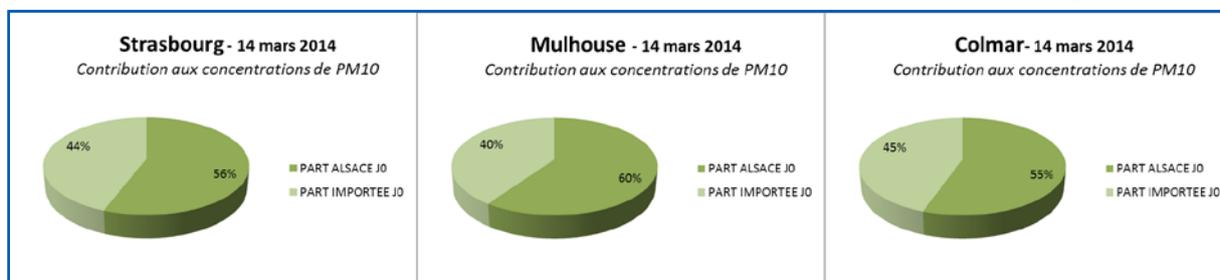


Figure 18

Parts de particules PM₁₀ provenant des émissions locales anthropiques alsaciennes, et part de particules importées, par utilisation de la méthode de coupure avec CHIMERE.

Share of PM₁₀ particles from local Alsatian anthropogenic origin, and share of imported PM₁₀, obtained with CHIMERE with the zero method.

gestion des épisodes de pollution.

D'après le Haut Conseil de la Santé Publique, l'impact sanitaire cumulé de la pollution atmosphérique dépend plus des nombreuses journées à pollution moyenne que des pics épisodiques. D'où l'intérêt des politiques d'amélioration permanente de la qualité de l'air, tout en gérant les pics.

En Alsace, les préfetures ont été pionnières pour les particules, en mettant en place des procédures d'information et de mesures d'urgence depuis près de 20 ans. Ces procédures révisées en 2004 puis 2012 sont régulièrement mises en œuvre au cours des périodes hivernales. Par délégation préfectorale, l'ASPA informe la population et transmet les recommandations préfectorales sanitaires et comportementales au-delà d'un premier seuil dit de recommandations. Au-delà du second seuil dit d'alerte, l'ASPA transmet à la population des recommandations renforcées, et le Préfet déclenche le cas échéant des mesures d'urgence.

Le seuil d'alerte actuellement en vigueur en Alsace, conformément aux arrêtés préfectoraux du 10 juillet 1997 (Bas-Rhin) et du 14 août 1997 (Haut-Rhin) révisés par les arrêtés préfectoraux du 9 juin 2004 et modifiés le 1^{er} février 2012, s'élève à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne glissante sur 24h, et le seuil de recommandations à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne glissante sur 24h. Les exigences ont été renforcées car avant la modification du 1^{er} février 2012, le seuil d'alerte était fixé à $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne glissante sur 24h, alors que $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondait au seuil de recommandations.

En cas de déclenchement de procédure préfectorale d'information ou d'alerte, l'ASPA mobilise ses agents d'astreinte 24h/24 et 7J/7 pour suivre les niveaux de concentrations en particules, et par délégation préfectorale informe la population et les autorités de l'évolution de la situation, et transmet quotidiennement les recommandations comportementales des préfets et les recommandations sanitaires de l'Agence Régionale de Santé *via* les médias, messageries, web et réseaux sociaux. Une diffusion particulière est réalisée auprès des relais des personnes sensibles : réseaux de médecins, hôpitaux, rectorat, lieux de la petite enfance, maisons de retraite, association des insuffisants respiratoires, comités départementaux sportifs.

S'agissant des épisodes de pollution, l'Euro-

métropole de Strasbourg, le Conseil Général du Bas-Rhin, la ville de Mulhouse et bientôt la ville de Colmar disposent de plans volontaires à court terme pour l'ozone et les particules en accompagnement des procédures préfectorales. Ces dernières seront d'ailleurs bientôt révisées dès la signature en cours d'un nouvel arrêté interministériel prévoyant le passage en alerte en cas de persistance de procédure d'information.

Sur la durée, l'amélioration continue se fait à travers les plans à moyen terme et long terme de protection atmosphérique, de déplacements urbains, d'urbanisme, de santé, etc., en lien avec la transition climatique et énergétique, cadrés par le Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie porté par la Région Alsace et l'État. Cela se traduit par des actions concertées de longue haleine qui touchent toutes les activités humaines : transports, chauffage, industries, logements, agriculture, etc.

Toutes ces actions locales en lien avec les actions nationales et européennes ont conduit à des bilans annuels à la baisse pour la plupart des indicateurs, et ont pour vocation d'accélérer cette baisse pour passer sous les normes de santé et protéger en priorité les populations les plus vulnérables et les plus exposées.

Épisode du 9 au 15 janvier 2009

Après avoir entraîné le déclenchement d'une procédure d'information et de recommandations sur le Haut-Rhin, les niveaux de pollution ont nécessité, conformément aux seuils en vigueur en 2009, la mise en place d'une procédure graduée de recommandations puis d'alerte à la population sur le Bas-Rhin durant les quatre journées du 12 au 15 janvier 2009.

L'intensité et la durée de l'épisode ont engendré une mobilisation des gestionnaires de la qualité de l'air. Des recommandations préfectorales ont été émises pour limiter les rejets du trafic routier et des installations de chauffage, industrielles et agricoles. Au niveau d'alerte, la préfecture du Bas-Rhin a réglementairement limité la vitesse sur les principaux axes routiers strasbourgeois. Le Conseil Général du Bas-Rhin et la Communauté Urbaine de Strasbourg ont volontairement mis en place des tarifs préférentiels et jusqu'à une journée de gratuité pour le Réseau 67 de bus interurbains. Ces recommandations et mesures visent en particulier le transfert des usagers vers



Figure 19

Page d'accueil du site web de l'ASPA, le 13 janvier 2009 : cartes urbaines et régionales de qualité de l'air, et alerte activée.

Homepage of the ASPA website on 9 January 2009: urban and regional air quality maps and activated alert warning.

les transports collectifs afin de réduire l'exposition des populations, notamment à proximité des grands axes de circulation.

Épisode du 7 au 12 février 2010

Lors de cet épisode de pollution, les nouveaux seuils d'information et d'alerte n'étaient pas encore en vigueur. La procédure préfectorale au seuil d'information a été déclenchée le 11 février dans l'après-midi et levée dès le lendemain, 12 février, en début de matinée.

Le réseau de mesures en direct et la prévision quotidienne réalisée à l'échelle du fossé rhénan et zoomée sur les centres urbains de Strasbourg, Colmar et Mulhouse (figure 19) ont servi d'aide à la prévision en permettant d'anticiper et d'affiner

géographiquement la localisation et le déplacement des masses d'air les plus polluées.

Épisode du 7 au 15 mars 2014 : un épisode de pollution longue durée

Les nouveaux seuils étaient en vigueur, et à la suite de plusieurs dépassements du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24h en PM_{10} sur le réseau de mesures de l'ASPA, les procédures préfectorales d'information et de recommandations à destination des populations ont été déclenchées le 7 mars 2014 sur le Haut-Rhin et le Bas-Rhin. Les niveaux se sont ensuite progressivement élevés

jusqu'à dépasser le seuil d'alerte en situation de fond urbain à Mulhouse, nécessitant le déclenchement de la procédure d'alerte à la population le 14 mars en milieu d'après-midi sur le département du Haut-Rhin. Les conditions d'alerte en fond urbain n'ont pas été réunies sur le Bas-Rhin. Les niveaux de concentrations en PM_{10} ont ensuite décliné à partir du 15 mars, avec une levée de la procédure d'alerte dans le Haut-Rhin le 15 mars en fin d'après-midi et l'ensemble des procédures d'information le 16 mars.

Les conditions de déclenchement de la procédure préfectorale en vigueur en mars 2014 portent sur le dépassement ou risque de dépassement de deux stations de mesures dont une station de fond (urbaine ou rurale), l'autre pouvant être une station de proximité du trafic. Le passage en niveau d'alerte est basé sur un critère de seuil d'alerte plus élevé, sans notion de persistance au seuil d'information plusieurs jours de suite.

Le déclenchement de la procédure d'alerte sur le Haut-Rhin, le vendredi 14 mars, avait été fondé sur le dépassement avéré d'une des stations de fond (Mulhouse Sud) avec risque de dépassement sur une deuxième station de fond (Mulhouse Nord) qui a finalement plafonné quelques heures à $79 \mu\text{g}/\text{m}^3/24 \text{ h}$. Du fait que la prévision de la pollution aux particules annonçait une baisse significative des taux de particules dès le lendemain en journée, il n'y a pas eu de déclenchement préfectoral de mesures d'urgence sur la journée du samedi 15 mars.

Pour le Bas-Rhin, et Strasbourg en particulier, le prévisionniste de l'ASPA, s'appuyant notamment sur les modèles de prévisions et sur l'évolution de la masse d'air, avait transmis aux autorités préfectorales du Bas-Rhin et communautaires de Strasbourg le très faible risque de dépassement du seuil réglementaire d'alerte sur les stations de fond, ce qui fut vérifié, les valeurs 24h étant restées proches mais en dessous de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La notion de persistance prévue dans le nouvel arrêté interministériel relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant adopté le 26 mars 2014 prévoit qu'au quatrième jour de procédure au niveau d'information, il y a passage automatique au niveau d'alerte, ce qui aurait bien été le cas sur l'agglomération de Strasbourg au cours de cet épisode.

Cet article aura permis de faire la part des origines dominantes des trois types d'épisodes de pollution aux particules PM_{10} avec :

- des situations hivernales d'apports transfrontaliers prédominants de masses d'air en transit qui se sont chargées en particules, principalement à longue distance du Rhin supérieur ;

- des situations de pollutions locales prédominantes sous inversion de températures défavorisant la dispersion dans la vallée encaissée du Rhin supérieur entre Vosges et Forêt Noire ;

- des pics de pollution printaniers favorables à la combinaison de l'ammoniac agricole avec les oxydes d'azote, principalement dus aux transports, avec formation secondaire de nitrates d'ammonium particulaire entrant dans la composition des PM_{10} respirés.

Dans tous les cas, une attention est à porter au trafic routier, source locale d'inégalité d'exposition à la pollution.

Conclusion et perspectives

Cette connaissance des différents types de pics de pollution aux particules contribue à une meilleure gestion des épisodes en aide à la décision, aussi bien pour l'information à diffuser que pour les mesures d'urgence à mettre en place le cas échéant. La diffusion de telles informations participe ainsi à un dialogue social plus éclairé et respectueux entre les experts, les autorités publiques, les collectivités, les associations citoyennes et tout simplement les citoyens. La transcription en arrêté préfectoral du nouvel arrêté interministériel relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant en cours d'adoption (adopté le 26 mars 2014) clarifiera la règle du passage en alerte lors de la persistance d'un épisode au premier niveau d'information. Cet arrêté confirme le maintien de seuils français d'information et d'alerte pour les particules non exigés par l'Europe. Il n'en restera pas moins une bonne coopération entre les organismes de surveillance de la qualité de l'air alsaciens, badois et bâlois ayant mis en commun une partie de leurs outils de prévisions (www.atmo-rhena.net).

L'approfondissement de la connaissance de ces épisodes bénéficie aussi des résultats d'analyses *a posteriori* de filtres de particules préle-

vées (programme Cara), et passe par des instruments de mesure en continu différenciant le type et l'origine des particules. Ainsi un aethalomètre capable de différencier les particules issues de la combustion de la biomasse ou des produits pétroliers a été mis en service à Strasbourg par l'ASPA.

Enfin, la meilleure perspective souhaitable reste, au moment des pics et tout au long de l'année, la réduction de fond des particules primaires et des précurseurs des particules secondaires. Car, en effet, les pics de pollution aux particules ne contribuent que faiblement à l'impact sanitaire annuel, et cela pour deux raisons. D'une part, les effets à court terme des autres journées pèsent

en cumulés sur une année bien plus que les épisodes de pollution, car si l'excès de risque journalier est plus important lors d'un pic de pollution, il n'est pas nul les autres jours (effet sans seuil). D'autre part, l'impact sanitaire des effets à court terme est, pour une population, globalement plus faible que celui des effets à long terme engendrés par l'exposition chronique aux niveaux moyens de particules. C'est pourquoi la reconquête d'une qualité de l'air acceptable passe avant tout par la réglementation et la planification réglementaire, associées à la sensibilisation des acteurs publics et privés jusqu'au citoyen concerné dans son mode de déplacement, de consommation, d'habitation..., bref son mode de vie.

1. Ingénieur Études, pilote des activités de modélisation, ASPA/ATMO Alsace.
2. Professeur honoraire, université de Strasbourg, président APPA-Alsace.
3. Ingénieur Études, ASPA/ATMO Alsace.
4. Directeur, ASPA/ATMO Alsace.

Références

- Arrêtés préfectoraux du Bas-Rhin et du Haut-Rhin du 9 juin 2004 relatifs à l'information des populations en cas d'épisode de pollution atmosphérique par l'ozone, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote et par les particules en suspension dans l'atmosphère et la mise en œuvre des premières mesures d'urgence.
- Arrêtés préfectoraux du Bas-Rhin et du Haut-Rhin du 1er février 2012 portant modification des arrêtés préfectoraux du 9 juin 2004 relatifs à l'information des populations en cas d'épisode de pollution atmosphérique et la mise en œuvre des premières mesures d'urgence.
- Arrêté du 26 mars 2014 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant.
- Arrêté du 20 août 2014 relatif aux recommandations sanitaires en vue de prévenir les effets de la pollution de l'air sur la santé.
- ASPA. (2008). Rapport relatif à l'évaluation des mesures d'urgence potentiellement mises en œuvre en Alsace pour limiter les pics de pollution atmosphérique, 08063002-ID.
- Atmo-rhenA. (2001-2006). Système commun d'évaluation et d'information sur la qualité de l'air dans l'espace du Rhin supérieur, Gemeinsames Informations- und Bewertungssystem über die Luftqualität im Oberrheingebiet, Projet INTERREG III A Rhin supérieur.
- Avis du Haut Conseil de la santé publique relatif aux messages sanitaires à diffuser lors d'épisodes de pollution de l'air ambiant par les particules, l'ozone, le dioxyde d'azote et/ou le dioxyde de soufre en date du 15 novembre 2013.
- Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.
- Plan de Protection de l'Atmosphère de l'agglomération strasbourgeoise, préfet du Bas-Rhin, avec la contribution technique de l'ASPA, 2014.
- Plan particules de l'Eurométropole de Strasbourg (anciennement Communauté Urbaine de Strasbourg - CUS).
- Plan particules du Conseil Général du Bas-Rhin (CG67).
- Plan particules de la Communauté d'Agglomération de Colmar (CAC).
- REKLIP. (1995). Atlas climatique du fossé rhénan méridional, Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd, 2 vol., IFG Offenbach, Ed.Coprur, Strasbourg, vdf Zürich.
- REKLIP. (1999). Qualité de l'air et climat régional, Luftqualität und Regionalklima, rapport final, Schlussbericht, vol. 3, Ed.Coprur, Strasbourg.
- The Chimere chemistry-transport model, A multi-scale model for air quality forecasting and simulation, développé par l'IPSL/LMD (Palaiseau), l'INERIS (Verneuil-en-Halatte) et l'IPSL/LISA (Creteil) en France. [En ligne] : <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>