www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Revue de littérature CARA

Le programme CARA en région AuRA

2009 - 2026

Auteur : Albane Barbero

Diffusion : Novembre 2026

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr

Conditions de diffusion

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de *l'article L.220-1 du Code de l'environnement*. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de *l'article L.220-2 du Code de l'Environnement*.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, …) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : **© Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (2026) Revue de littérature CARA : Le programme CARA en région AuRA.**

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le formulaire de contact
- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Version éditée le 31 octobre 2026

Financement

Le programme CARA est principalement financé par le ministère chargé de l'Environnement, via des subventions annuelles aux AASQA et aux membres du LCSQA, complétées par des programmes et projets de recherche de l'Ineris et de ses partenaires.



Résumé

Le programme national CARA (Caractérisation Chimique des Particules), coordonné par le LCSQA/INERIS, fournit des mesures détaillées de la composition physico-chimique des particules en suspension. Cette revue porte sur 57 documents du corpus de référence qui exploitent directement ou indirectement des données issues des stations d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, sur 88 documents recensés à ce jour. Le corpus couvre la période 2009-2026.

La littérature montre une évolution du programme en trois étapes principales : caractérisation chimique des épisodes de pollution, développement d'approches harmonisées pour identifier les sources, puis constitution de séries de mesures automatiques et pluriannuelles. Les ACSM et les aethalomètres AE33 ont fortement augmenté la résolution temporelle, tandis que les prélèvements sur filtres apportent une caractérisation plus fine de certains traceurs organiques.

En Auvergne-Rhône-Alpes, Grenoble Les Frênes et Lyon Centre sont les deux principaux sites équipés d'ACSM. Plusieurs sites disposent également d'AE33 pour le suivi du carbone suie. Les données permettent d'étudier la contribution de la combustion de biomasse, du trafic, de la formation secondaire de l'aérosol organique et du transport régional, en tenant compte de la météorologie et de la topographie.

À Grenoble, les travaux portent notamment sur la combustion de biomasse, la spéciation organique et les HAP oxygénés et nitrés. À Lyon, les données mettent notamment en évidence l'importance des processus photochimiques estivaux. À l'échelle nationale, la matière organique représente généralement 43–60 % de la PM_1 mesurée par ACSM sur les 13 sites étudiés entre 2015 et 2021, tandis que les nitrates constituent une autre fraction importante. Le corpus montre aussi l'importance de l'harmonisation métrologique et des méthodes d'attribution des sources, notamment la PMF. Ces méthodes permettent de relier la composition des particules aux sources possibles, mais leur interprétation reste dépendante des variables utilisées, des incertitudes et des hypothèses retenues.

Enfin, les données et archives CARA sont désormais utilisées pour des questions qui dépassent la caractérisation classique des PM. Le projet PFAhiStory, par exemple, prévoit l'analyse rétrospective d'échantillons historiques de PM10 prélevés à Lyon Centre pour rechercher des PFAS. Cette évolution confirme l'intérêt des séries historiques comme infrastructure de données réutilisable. L'enjeu actuel est donc moins de produire davantage de mesures que de mieux exploiter les séries existantes : croiser composition, sources, météorologie et modèles, documenter les incertitudes et valoriser les archives pour de nouvelles problématiques environnementales.

Sommaire

1. Méthodologie de la revue 6

2. Chronologie et structuration du programme (2009-2026) 7

2.1. Une évolution en quatre temps 7
2.2. Ce que montre cette trajectoire 7
2.3. Le rôle d'Atmo AuRA dans le corpus 8

3. Données, instrumentation et méthodes d'analyse 9

4. 9

3.1. ACSM, AE33 et prélèvements différés 9
3.2. Harmonisation et assurance qualité 9

4. Composition chimique et sources des particules 10

4.1. Résultats nationaux 10
4.2. Identification et déconvolution des sources 10
4.3. Épisodes de pollution et résolution temporelle 10
4.4. Attribution des sources : PMF et carbone suie 10
4.5. Aérosol organique 11
4.6. Épisodes de pollution et résolution temporelle 11

5. Focus AuRA : Grenoble et Lyon 12

5.1. Grenoble Les Frênes 12
5.2. Lyon Centre 12

6. Thématiques émergentes et nouvelles utilisations des archives 13

7. 13

6.1. Potentiel oxydant : relier composition et toxicité potentielle 13
6.1.1. Effets sanitaires et potentiel oxydant (PO) 13
6.1.2. Composante biologique de l'aérosol 13
6.2. Réutilisation des archives : PFAS à Lyon 14

7. Assurance qualité, comparabilité et modélisation 15

8. Synthèse, limites et perspectives 17

8.1. Acquis 17
8.2. Limites et points de vigilance 17
8.3. Lacunes et perspectives de recherche pour Atmo AuRA 18

9. Conclusion générale 19

1. Méthodologie de la revue

Le corpus analysé provient du fichier de suivi bibliographique constitué par Atmo AuRA, qui recense les rapports institutionnels (LCSQA/INERIS), les notes techniques et stratégiques, les guides méthodologiques, les articles scientifiques à comité de lecture, les publications de synthèse, une thèse et un jeu de données ouvert, couvrant la période 2009-2026. Les documents ont été classés selon leur lien avec CARA : documents consacrés au programme, travaux utilisant ses données, productions scientifiques associées, simples mentions et rapports d'AASQA. Seuls les documents identifiés comme concernant les données d'Atmo AuRA sont retenus dans cette revue ; 31 documents du corpus exhaustif sont donc exclus.

Les documents ont ensuite été regroupés par fonction scientifique : (i) structuration du programme CARA ; (ii) instrumentation et assurance qualité ; (iii) composition chimique ; (iv) épisodes de pollution ; (v) identification et quantification des sources ; (vi) combustion de biomasse ; (vii) aérosol organique et traceurs ; (viii) potentiel oxydant ; (ix) exploitation de séries temporelles longues ; (x) réutilisation des archives CARA pour de nouveaux contaminants. La revue est volontairement centrée sur la valeur des données Atmo AuRA. Les résultats nationaux ne sont donc pas présentés comme des résultats spécifiques à AuRA lorsque le document ne l'autorise pas ; ils sont utilisés comme cadre de comparaison et comme preuve de la robustesse des méthodes employées sur les sites régionaux.

Les travaux analysés se répartissent de manière à peu près équilibrée entre la production technique et réglementaire nationale (LCSQA) et la valorisation scientifique académique de haut niveau dans des revues internationales à comités de lecture :

Type de document	Nombre	Principaux Acteurs / Revue
Rapport d'activité & Bilan CARA	15	LCSQA / INERIS
Article scientifique de rang A	24	Atmospherric Environment, ACP, STOTEN, AMT, ESSD, Atmosphere
Guides méthodologiques & notes techniques	9	LCSQA, INERIS, JRC, Commission Européenne
Rapport de modélisation Prev'air	4	LCSQA (modèle CHIMERE)
Thèses, Communications & jeux de données (Data)	4	HAL, Zenodo, ACTRIS
Projets de recherche prospective	1	PFAhiStory (Atmo AuRA / INERIS / UPVD)

2.Chronologie et structuration du programme (2009-2026)

2.1. Une évolution en quatre temps

Le corpus montre une évolution progressive : CARA est passé d'une logique d'analyse d'épisodes à une infrastructure de données destinée à la surveillance, à la recherche et à l'évaluation des modèles.

2009-2013 : lancement et consolidation. Les premiers bilans mettent en place le réseau de prélèvement PM_{10} et les premières méthodes de caractérisation chimique. Les travaux portent principalement sur les épisodes de pollution et sur la composition des particules. Cette période établit le fonctionnement conjoint des AASQA, du LCSQA/INERIS et des laboratoires de recherche.

2014-2019 : structuration méthodologique et montée en puissance. Les protocoles sont progressivement harmonisés, notamment pour les mesures EC/OC. La PMF devient un outil central pour l'attribution des sources et les traitements sont standardisés. Le réseau s'étend à plusieurs sites français. Les études montrent que des épisodes de même intensité peuvent avoir des compositions et des origines différentes. À partir du milieu des années 2010, les ACSM et les AE33 introduisent des mesures quasi continues. Elles permettent d'étudier les cycles diurnes, les changements météorologiques et les épisodes avec une résolution temporelle beaucoup plus fine.

2020-2022 : consolidation et bilan décennal. Cette période est marquée par la publication de l'article de synthèse de référence du programme (*Atmosphere*, 2021) et par la synthèse décennale 2008-2020 (LCSQA/INERIS, 2022) qui formalisent les acquis du programme et consolident les procédures de mesure et d'analyse.

2023-2026 : ouverture des données et diversification thématique. Le jeu de données 2015-2021 est diffusé pour 13 sites. Les guides ACSM et AE33 sont révisés, les évaluations Prev'air/CHIMERE se poursuivent et de nouvelles applications apparaissent, notamment avec le projet PFAhiStory sur les PFAS.

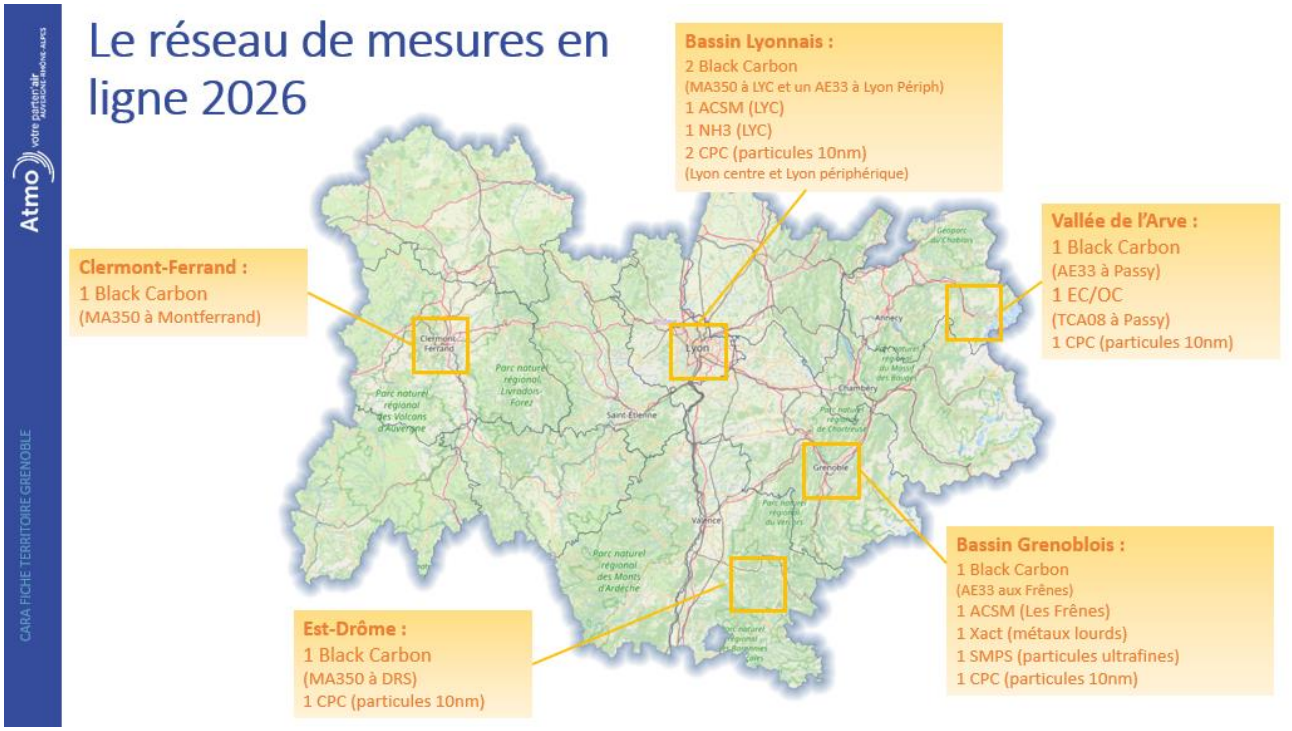
2.2. Ce que montre cette trajectoire

Le passage d'une logique d'épisodes à une infrastructure de données repose sur trois évolutions complémentaires : de la masse vers la composition chimique, de la composition vers l'attribution des sources, puis de la mesure différée vers la mesure quasi continue. L'ouverture du jeu de données confirme ce

changement de statut : CARA n'est plus seulement un outil d'analyse ponctuelle, mais une ressource partagée entre surveillance, recherche et modélisation.

2.3. Le rôle d'Atmo AuRA dans le corpus

Atmo AuRA contribue au programme par des prélèvements avec analyses différées et par des mesures automatiques. Deux ACSM sont installés à Lyon Centre et Grenoble Les Frênes pour caractériser notamment le sulfate, le nitrate, l'ammonium, le chlorure et la matière organique dans la PM_1. Plusieurs AE33 mesurent le carbone suie dans la $PM_{2.5}$, notamment à Lyon Centre, Lyon Périphérique, Grenoble Les Frênes, Montferrand, Passy et Drôme Rural Sud, ainsi que sur certains sites d'étude (Annemasse 2015-2025).



Les prélèvements de filtres CARA avec analyses différées sont réalisés à Lyon Centre et Grenoble Les Frênes sur la fraction PM_{10} et Grenoble Les Frênes et Drôme Rural Sud pour la fraction $PM_{2.5}$. Ils permettent d'accéder à des traceurs organiques, aux HAP et à d'autres espèces qui ne sont pas directement mesurées par l'ACSM.

3. Données, instrumentation et méthodes d'analyse

3.1. ACSM, AE33 et prélèvements différés

Les ACSM mesurent en continu la composition de la fraction submicronique non réfractaire (NR-PM1), notamment la matière organique, le nitrate, le sulfate, l'ammonium et le chlorure non marin. Les AE33 mesurent le carbone suie et permettent, sous certaines hypothèses, de distinguer les contributions liées aux combustibles fossiles et à la biomasse.

Les analyses sur filtres complètent ces mesures avec des traceurs qui ne sont pas accessibles en continu avec les mêmes instruments : lévoglucosan, polyols, HAP et autres composés organiques. La combinaison online/offline est donc essentielle pour relier résolution temporelle et résolution chimique.

3.2. Harmonisation et assurance qualité

Une part importante du corpus concerne la comparabilité des mesures. Les intercomparaisons, les procédures d'étalonnage et les guides de traitement visent à limiter les effets des dérives instrumentales, des différences de configuration et des choix de traitement.

Pour les séries pluriannuelles, cette documentation est indispensable : les changements de calibration, de maintenance, de disponibilité ou de traitement doivent être tracés. Les guides ACSM, AE33 et SoFi Pro publiés ou révisés entre 2022 et 2026 renforcent ce cadre. L'ACMCC (lire encadré), consortium réunissant le CEA, le CNRS et l'INERIS, joue un rôle central dans l'étalonnage, les intercomparaisons et l'assurance qualité des mesures ACSM en France.

L'ACMCC (Centre d'étalonnage des moniteurs chimiques d'aérosols) est un consortium de laboratoires français réunissant le CEA, le CNRS (LSCE et LaMP) et l'INERIS. Il garantit la qualité des données des analyseurs chimiques d'aérosols en ligne et fournit des mesures indépendantes et colocalisées des paramètres chimiques, physiques et optiques des aérosols. Référence pour les mesures ACSM en Europe (infrastructure de recherche ACTRIS) et en France (LCSQA), il mène des activités de recherche et d'innovation, de formation et de certification, ainsi que d'élaboration de recommandations et d'outils. Il organise régulièrement des campagnes d'intercomparaison et des ateliers, et propose des services de gestion et de valorisation des données ACSM.

4. Composition chimique et sources des particules

4.1. Résultats nationaux

Les travaux multisites montrent que la matière organique représente généralement la principale fraction de la PM_1 mesurée par ACSM. Dans le jeu de données 2015-2021, elle représente environ 43 à 60 % de la masse selon les sites. Les nitrates constituent une autre fraction importante, généralement de l'ordre de 15 à 30 %.
La saisonnalité est nette. En hiver, les émissions liées au chauffage résidentiel et les conditions de faible dispersion favorisent l'accumulation des particules. En été, les processus photochimiques contribuent davantage à la formation d'aérosol organique secondaire.

Ces valeurs constituent un référentiel national pour comparer Lyon et Grenoble. Elles ne permettent pas, à elles seules, d'attribuer une source à une station donnée : les différences observées peuvent dépendre des émissions, de la météorologie, de la topographie et du transport régional.

4.2. Identification et déconvolution des sources

Les AE33 permettent d'estimer des contributions différenciées du carbone suie associé aux combustibles fossiles et à la biomasse, sous réserve des hypothèses et incertitudes propres à la méthode. Leur déploiement sur plusieurs sites régionaux complète les informations détaillées fournies par les ACSM.

4.3. Épisodes de pollution et résolution temporelle

Les premières études CARA se sont appuyées sur les épisodes de pollution pour tester les méthodes de caractérisation. Les mesures quasi continues permettent aujourd'hui de suivre l'apparition, le développement et la dissipation des épisodes et de relier ces phases aux conditions météorologiques et aux changements de sources. À Lyon et Grenoble, cette résolution temporelle est particulièrement utile lors des situations de stagnation atmosphérique. Les cycles horaires peuvent aider à distinguer des contributions locales de trafic ou de chauffage de contributions régionales plus homogènes.

4.4. Attribution des sources : PMF et carbone suie

La PMF est devenue une méthode centrale pour passer de la composition mesurée à des familles de sources. Les traitements harmonisés facilitent les comparaisons entre sites, mais un facteur PMF reste une construction statistique. Son interprétation doit être confrontée aux traceurs chimiques, aux cycles temporels, à la météorologie, aux inventaires d'émissions et, lorsque cela est possible, aux modèles de transport. La PMF constitue l'une des principales méthodes d'attribution des sources dans le corpus. Les travaux multisites

montrent qu'elle permet d'identifier des familles de sources communes tout en conservant des signatures locales. Son interprétation doit cependant être confrontée aux traceurs chimiques, aux cycles temporels, à la météorologie, aux inventaires d'émissions et, lorsque cela est possible, aux modèles de transport. Les AE33 apportent une information complémentaire sur le carbone suie. Leur mesure continue et leur déploiement sur plusieurs environnements régionaux permettent de comparer des situations urbaines, routières et de vallée.

4.5. Aérosol organique

La fraction organique mesurée par ACSM ne permet pas, à elle seule, de distinguer toutes les sources. Les travaux menés notamment à Grenoble montrent l'intérêt de combiner les mesures ACSM avec des traceurs organiques et des prélèvements sur filtres.

Les polyols et le glucose peuvent servir de traceurs d'aérosols organiques biogéniques primaires. Cette contribution doit être considérée en AuRA, où les gradients d'altitude, de végétation, d'urbanisation et de climat sont importants. À l'inverse, les épisodes hivernaux riches en matière organique et en carbone suie peuvent être fortement influencés par la combustion de biomasse.

Les travaux sur l'aérosol organique montrent aussi les limites d'une mesure globale de la fraction organique. Des traceurs tels que les polyols, le glucose, l'arabitol et le mannitol apportent des informations supplémentaires. Ils sont notamment utiles pour caractériser les aérosols organiques biogéniques et éviter d'attribuer automatiquement toute hausse estivale de la matière organique à une source anthropique.

4.6. Épisodes de pollution et résolution temporelle

Les séries quasi continues permettent de suivre la formation et la dissipation des épisodes et de les relier aux changements météorologiques et aux sources. À Lyon et Grenoble, les cycles horaires peuvent aider à distinguer des contributions locales de trafic ou de chauffage de contributions régionales plus homogènes.

5.Focus AuRA : Grenoble et Lyon

5.1. Grenoble Les Frênes

Grenoble Les Frênes est un site majeur du dispositif CARA en AuRA. Sa situation dans une vallée alpine, avec des épisodes fréquents de stabilité atmosphérique et d'inversion thermique, en fait un site adapté à l'étude des épisodes hivernaux et de la combustion de biomasse. Le suivi de la composition des PM_{10} y est documenté depuis 2008. Les travaux associent traceurs de combustion, carbone suie, composition organique et évolution temporelle. Ils montrent que la contribution de la biomasse varie avec la saison, la météorologie et les conditions de dispersion.

Les études sur les HAP oxygénés et nitrés complètent cette approche. Ces composés peuvent provenir d'émissions primaires ou de transformations atmosphériques. Leur analyse permet donc de mieux décrire le vieillissement de la matière organique et les limites d'une attribution fondée sur un nombre restreint d'espèces. Grenoble Les Frênes est l'un des principaux sites régionaux du programme. Sa situation dans une vallée alpine, avec des inversions thermiques fréquentes, en fait un site adapté à l'étude des épisodes hivernaux et de la combustion de biomasse. Le suivi de la composition des PM_{10} y est documenté depuis 2008.

5.2. Lyon Centre

Lyon Centre combine ACSM, AE33 et prélèvements différés. Cette configuration permet de relier la composition de la PM_1, le carbone suie et les traceurs organiques.

L'exploitation des données 2015-2021 met notamment en évidence l'importance des processus photochimiques en été. La pollution particulaire ne se limite donc pas aux émissions directes et aux épisodes hivernaux : la formation secondaire dépend aussi des précurseurs gazeux, de la chimie atmosphérique et des conditions météorologiques.

Lyon et Grenoble participent également aux analyses multisites nationales. Leurs séries contribuent ainsi à comparer les situations régionales à un ensemble plus large de sites français.

6. Thématiques émergentes et nouvelles utilisations des archives

6.1. Potentiel oxydant : relier composition et toxicité potentielle

6.1.1. Effets sanitaires et potentiel oxydant (PO)

Les travaux sur le potentiel oxydant (PO) ajoutent une dimension sanitaire au corpus et marquent l'élargissement progressif des usages du dispositif CARA au-delà de la seule composition chimique massique. Indicateur de plus en plus mobilisé pour approcher la toxicité potentielle des particules, le PO permet de déterminer si la masse de PM constitue un indicateur suffisant de leur activité oxydante. Les analyses multisites et multi-annuelles montrent qu'il varie selon les saisons et les signatures chimiques des particules.

Ce volet repose sur deux publications complémentaires : une étude des variations saisonnières et des prédicteurs chimiques du PO sur sept sites urbains français (*Atmosphere*, 2019), puis une synthèse d'attribution des sources du PO des PM_{10}, combinant quinze années de jeux de données urbains par PMF, qui inclut les données de composition chimique d'Atmo AuRA (*Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021). Une comparaison méthodologique de cinq approches d'attribution des sources de l'aérosol organique lors d'un épisode de pollution complète ce volet (*Science of the Total Environment*, 2021).

Pour Atmo AuRA, cette approche ouvre une perspective importante : deux épisodes de masses similaires peuvent présenter des compositions très différentes, et donc des propriétés toxicologiques potentiellement distinctes. Le couplage entre ACSM/AE33, traceurs organiques et mesures de PO pourrait ainsi permettre d'identifier des profils de pollution particulièrement pertinents du point de vue sanitaire.

6.1.2. Composante biologique de l'aérosol

La fraction biologique est également investiguée. Une étude de la variabilité du microbiome atmosphérique des PM_{10} dans trois régions climatiques françaises mobilise les échantillons et le dispositif associés au programme CARA (*Frontiers in Microbiology*, 2021). Les aérosols organiques biogéniques primaires (PBOA) font l'objet de deux publications sur les polyols et le glucose comme traceurs : l'une porte sur 28 sites français, l'autre sur l'influence des facteurs environnementaux sur l'arabitol, le mannitol et le glucose à l'échelle nationale (*Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019 pour les deux).

6.2. Réutilisation des archives : PFAS à Lyon

Le projet PFAhiStory représente une évolution conceptuelle importante du dispositif. Au lieu de considérer les filtres CARA uniquement comme des supports d'analyses liées aux épisodes de PM, le projet exploite les archives historiques de PM_{10} collectées à Lyon Centre pour rechercher des PFAS. Le projet couvre une période historique allant de janvier 2015 à mai 2026 et prévoit une campagne complémentaire jusqu'en mai 2027.

Cette démarche démontre la valeur patrimoniale des archives CARA : leur intérêt ne se limite pas aux questions initialement posées au moment du prélèvement. Elles peuvent être réanalysées avec de nouvelles méthodes pour étudier des contaminants émergents. Pour Atmo AuRA, cela positionne Lyon Centre comme une archive environnementale à long terme, utile pour documenter l'évolution des contaminations et non seulement la pollution particulaire réglementaire.

7. Assurance qualité, comparabilité et modélisation

Les bilans annuels et pluriannuels du LCSQA/INERIS documentent l'évolution du programme CARA depuis sa mise en place, notamment en ce qui concerne le développement du réseau, les évolutions instrumentales, les modalités de mesure et les orientations scientifiques. La synthèse décennale 2008-2020 (LCSQA/INERIS, 2022), complétée par les bilans successifs de 2008 à 2019 et par la note stratégique de 2019, constitue une base documentaire permettant de replacer les séries régionales dans leur contexte de production et d'identifier les changements susceptibles d'affecter leur interprétation.

La comparabilité des séries temporelles repose sur la traçabilité des conditions de mesure et de traitement des données. Pour les séries produites par Atmo AuRA, les changements de calibration, de maintenance, de disponibilité instrumentale, de configuration analytique et de traitement des données doivent ainsi être identifiés et documentés. Cette démarche permet de distinguer les variations attribuables aux propriétés de l'aérosol de celles pouvant résulter de modifications méthodologiques ou instrumentales. La comparabilité entre sites et entre périodes doit donc être considérée comme une propriété à vérifier à partir des métadonnées et des procédures de contrôle qualité, et non comme une hypothèse systématique.

Le corpus CARA fournit également un cadre pour l'évaluation des modèles de chimie-transport utilisés pour la prévision de la qualité de l'air. Les données de composition chimique sont notamment mobilisées dans les évaluations annuelles du système Prev'air, fondé sur le modèle CHIMERE. Les rapports consacrés aux années 2021 (LCSQA/INERIS, 2023), 2022 (LCSQA/INERIS, 2024), 2023 (LCSQA/INERIS, 2025) et 2024 (LCSQA/INERIS, 2026) permettent d'examiner, sur plusieurs années, la capacité du modèle à reproduire les concentrations et la variabilité de la composition des particules, notamment pour la fraction PM_1. Le rapport relatif à 2024 intègre également l'évaluation du Black Carbon. Cette série constitue ainsi un support pour l'analyse de la cohérence entre concentrations simulées et observations, y compris sur les sites situés en Auvergne-Rhône-Alpes.

Sur le plan méthodologique, le guide du Joint Research Centre de la Commission européenne consacré à l'attribution des sources par modèles récepteurs (JRC / Commission européenne, 2019) fournit le cadre de référence pour l'application de méthodes telles que la Positive Matrix Factorization (PMF). Il précise notamment les principes de préparation des données, de sélection des variables, d'évaluation des incertitudes et d'interprétation des facteurs. Les recommandations françaises relatives à l'exploitation des données issues des instruments ACSM et AE33 complètent ce cadre en tenant compte des caractéristiques spécifiques de ces dispositifs de mesure.

L'utilisation de référentiels communs pour l'acquisition, le contrôle et le traitement des données contribue ainsi à limiter les écarts méthodologiques entre séries. Elle facilite l'évaluation de leur comparabilité, l'analyse des évolutions temporelles et la confrontation des observations entre sites, tout en permettant d'identifier les ruptures liées aux changements instrumentaux ou analytiques.

8.Synthèse, limites et perspectives

8.1. Acquis

- Continuité temporelle : le passage des campagnes ponctuelles aux séries pluriannuelles permet de séparer tendances, saisonnalité et épisodes.
- Résolution chimique : ACSM et AE33 donnent accès à des fractions majeures de la PM_1 et au carbone suie avec une résolution temporelle adaptée à l'analyse des épisodes.
- Complémentarité online/offline : les mesures continues sont enrichies par les prélèvements et analyses différées, notamment pour la spéciation organique et les traceurs.
- Comparabilité : l'harmonisation multisites et les procédures QA/QC renforcent la valeur des comparaisons Lyon–Grenoble et AuRA–France.
- Attribution des sources (déconvolution) : la PMF permet d'aller de la concentration vers les sources, surtout lorsque les résultats sont confortés par des traceurs et la dynamique temporelle.
- Réutilisation : les archives historiques permettent désormais d'étudier de nouveaux contaminants, comme l'illustre PFAhiStory.

8.2. Limites et points de vigilance

- La représentativité spatiale reste limitée : Lyon Centre et Grenoble Les Frênes sont des stations urbaines de fond et ne résument pas toute la diversité des vallées alpines, zones industrielles et environnements ruraux d'AuRA.
- La PM_1 mesurée par ACSM ne représente pas toute la masse PM_{10} réglementaire ; l'interprétation doit donc distinguer soigneusement les fractions granulométriques.
- La PMF reste dépendante des variables retenues, des incertitudes et des contraintes. Un facteur statistique ne doit pas être interprété comme une source sans validation croisée.
- Les traceurs organiques ne sont pas tous disponibles en continu. Les campagnes offlines fournissent une résolution chimique plus fine mais une résolution temporelle plus faible.
- Les effets de la topographie et de la météorologie en AuRA peuvent modifier fortement la relation entre émissions locales, accumulation et transport régional.
- La comparaison pluriannuelle doit intégrer les changements instrumentaux et méthodologiques, malgré les progrès importants de QA/QC.

8.3. Lacunes et perspectives de recherche pour Atmo AuRA

- Construire une analyse régionale intégrée Lyon–Grenoble–vallées alpines à partir des ACSM, AE33, prélèvements différés et variables météorologiques.
- Quantifier séparément les contributions du chauffage au bois, du trafic, de l'aérosol organique secondaire et des sources biogéniques sur plusieurs années.
- Étudier les épisodes extrêmes par combinaison PMF + traceurs organiques + carbone suie + trajectoires/modélisation.
- Évaluer la stabilité des profils de sources dans le temps afin de détecter les effets des politiques publiques et de l'évolution du parc de chauffage et de mobilité.
- Développer le couplage composition–potentiel oxydant pour identifier des profils chimiques associés aux épisodes à plus fort enjeu sanitaire.
- Exploiter systématiquement les archives de prélèvements pour les contaminants émergents, dans la continuité de PFAhiStory.
- Documenter les incertitudes de mesure et de source apportionment dans toute analyse comparative régionale.

9.Conclusion générale

La littérature montre que les données CARA d'Atmo AuRA constituent bien davantage qu'un complément à la surveillance massique des particules. Elles forment une infrastructure d'observation chimique permettant de relier concentrations, composition, sources, météorologie et évolution temporelle. Grenoble Les Frênes et Lyon Centre jouent un rôle structurant dans cette infrastructure, en combinant mesures automatiques et prélèvements différés.

L'ensemble des travaux converge vers une lecture de la pollution particulaire fondée sur plusieurs régimes : combustion et accumulation hivernales, formation secondaire et photochimie estivales, contributions du trafic et du transport régional, et présence de fractions organiques d'origines multiples. La topographie et le climat de la région rendent nécessaire une approche fondée sur plusieurs traceurs et plusieurs échelles temporelles.

Le principal changement récent est le passage d'un programme de caractérisation à une véritable infrastructure de données. Les séries 2015–2021, leur documentation QA/QC, leur diffusion et les guides méthodologiques permettent désormais des analyses reproductibles. Les projets récents montrent enfin que les archives CARA ont une valeur scientifique durable : elles peuvent être réanalysées pour répondre à de nouvelles questions, comme la trajectoire historique des PFAS à Lyon.

Pour Atmo AuRA, l'enjeu des prochaines années est donc moins de démontrer l'intérêt de la mesure chimique que de l'exploiter de manière intégrée pour quantifier les sources, évaluer les politiques de réduction et mieux caractériser les risques associés aux différentes fractions de la pollution particulaire.

Bibliographie

Le tableau ci-dessous liste, par ordre chronologique, les 57 documents du corpus BIBLIO_CARA_2026 identifiés comme concernant les données Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (surlignage jaune du fichier source).

Année	Producteur — type	Titre	Thème	Référence
2009	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2008 (mise en œuvre)	Bilan / lancement	LCSQA
2009	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux de la première année (2008-2009)	Bilan	LCSQA
2010	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA - Bilan des travaux 2010	Bilan / chimie / modèle	LCSQA
2011	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2011	Bilan / PMF / métrologie	LCSQA
2011	Article scientifique — Atmospheric Environment	Assessing in near real time the impact of the April 2010 Eyjafjallajökull ash plume on air quality	Volcan / épisode	10.1016/j.atmosenv.2010.09.064
2012	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2012	Bilan / épisodes / sources	LCSQA
2012	LCSQA/INERIS — Rapport	Méthodologies de détermination de la composition chimique des particules submicroniques en temps réel	ACSM / temps réel	LCSQA
2012	LCSQA/INERIS — Rapport	Caractérisation chimique des particules : veille sur les études de caractérisation des PM	Méthodes / veille	LCSQA
2012	Article / synthèse — Pollution atmosphérique	Caractéristiques et origines principales des épisodes de pollution hivernaux aux PM10 en France	Épisodes hivernaux	Favez et al.
2012	Article / synthèse — Pollution atmosphérique	L'apport des méthodes d'analyse chimique des PM pour la connaissance des sources d'émission	Chimie / sources	Jaffrezo et al.

Année	Producteur — type	Titre	Thème	Référence
2014	LCSQA/INERIS — Rapport / RTN	Description du programme CARA du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air	Description / stratégie	LCSQA
2014	Article scientifique — Atmospheric Measurement Techniques	Clues for a standardised thermal-optical protocol for the assessment of organic and elemental carbon within ambient air particulate matter	EC/OC / métrologie	10.5194/amt-7-1649-2014
2014	Article / synthèse — Pollution atmosphérique	Estimation de la contribution des émissions véhiculaires à l'échappement et hors échappement aux teneurs atmosphériques en PM10 par Positive Matrix Factorization (PMF)	Trafic / PMF	Polo Rehn et al.
2015	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2013	Bilan / épisodes / PMF	LCSQA
2015	Article scientifique — Atmospheric Measurement Techniques	ACTRIS ACSM intercomparison: part I – Reproducibility of concentration and fragment results from 13 individual Q-ACSM and consistency with co-located instruments	ACSM / intercomparaison	10.5194/amt-8-5063-2015
2015	Article / synthèse — Pollution atmosphérique	Episodes de pollution particulaire en France : quels enseignements tirés des récents épisodes ?	Épisodes PM	Rouïl et al.
2016	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2014-2015	Bilan / AE33 / ACSM / sources	LCSQA
2016	LCSQA/INERIS — Rapport	Impact de la combustion de biomasse sur les concentrations de PM10 (programme CARA - hiver 2014-2015)	Biomasse / chauffage au bois	LCSQA
2016	Article / synthèse — Pollution atmosphérique	Le rôle de l'agriculture sur les concentrations en particules dans l'atmosphère et l'apport de la modélisation	Agriculture / modélisation	Bessagnet et al.
2017	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2016	Bilan / ACSM / BC / PMF	LCSQA

Année	Producteur — type	Titre	Thème	Référence
2017	LCSQA/INERIS — Rapport	Traitement harmonisé de jeux de données multi-sites pour l'étude de sources de PM par Positive Matrix Factorization (PMF)	PMF / harmonisation	LCSQA
2017	LCSQA/IMT — Rapport	Surveillance des métaux dans les particules en suspensions	Nogent-sur-Oise / Poitiers / SIRTA / PMF	LCSQA
2017	Article scientifique — Atmospheric Environment	Characterising an intense PM pollution episode in March 2015 in France from multi-site approach and near real time data: climatology, variabilities, geographical origins and model evaluation	Épisode national / modèle	10.1016/j.atmosenv.2017.02.012
2017	Article scientifique — Atmospheric Environment	Sources and atmospheric chemistry of oxy- and nitro-PAH in the ambient air of Grenoble (France)	Grenoble / HAP	10.1016/j.atmosenv.2017.04.042
2018	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2017	Bilan	LCSQA
2018	LCSQA/INERIS — Rapport	Suivi long terme des particules issus de la combustion de biomasse à Grenoble	Grenoble / biomasse	LCSQA
2018	LCSQA/INERIS — Rapport	Variations spatio-temporelles des espèces chimiques majeures et de composés traces des PM10 en France métropolitaine	19 sites / composition	LCSQA
2018	Article scientifique — Science of the Total Environment	Speciation of organic fraction does matter for source apportionment. Part 1: A one-year campaign in Grenoble (France)	Grenoble / organique	10.1016/j.scitotenv.2017.12.135
2019	LCSQA/INERIS — Note stratégique	Pistes d'évolution du programme CARA du dispositif national de la qualité de l'air	Stratégie / dimensionnement	LCSQA
2019	Article scientifique — Atmospheric	Polyols and glucose particulate species as tracers of primary biogenic organic aerosols at 28 French sites	Biogénique / 28 sites	10.5194/acp-19-3357-2019

Année	Producteur — type	Titre	Thème	Référence
	Chemistry and Physics			
2019	Article scientifique — Atmospheric Chemistry and Physics	Arabitol, mannitol, and glucose as tracers of primary biogenic organic aerosol: influence of environmental factors over France	Biogénique / France	10.5194/acp-19-11013-2019
2019	Article scientifique — Science of the Total Environment	Speciation of organic fraction does matter for source apportionment. Part 3: combining offline and online measurements	Organique / online-offline	10.1016/j.scitotenv.2019.06.378
2019	Article scientifique — Atmosphere	Seasonal variations and chemical predictors of oxidative potential of particulate matter (PM) for 7 urban French sites	Potentiel oxydant	10.3390/atmos10110698
2019	Article scientifique — Atmosphere	Comparison of PM10 source profiles at 15 French sites using a harmonized constrained positive matrix factorization approach	PMF / 15 sites	10.3390/atmos10060310
2019	Guide européen — JRC / Commission européenne	European Guide on Source Apportionment with Receptor Models – revised version	Modèles récepteurs / PMF	10.2760/439106
2021	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : bilan des travaux 2018-2019	Bilan / ACSM / BC / sources	LCSQA
2021	Article scientifique — Atmosphere	Overview of the French Operational Network for In Situ Observation of PM Chemical Composition and Sources in Urban Environments (CARA Program)	Programme / synthèse	10.3390/atmos12020207
2021	Article scientifique — Frontiers in Microbiology	Variability of the Atmospheric PM10 Microbiome in Three Climatic Regions of France	Biogénique / microbiome	10.3389/fmicb.2020.576750

Année	Producteur — type	Titre	Thème	Référence
2021	Article scientifique — Atmospheric Chemistry and Physics	Source apportionment of atmospheric PM10 oxidative potential: synthesis of 15 year-round urban datasets in France	PMF / potentiel oxydant	10.5194/acp-21-9719-2021
2021	Article scientifique — Science of the Total Environment	Comparison of five methodologies to apportion organic aerosol sources during a PM pollution event	PMF / AO	10.1016/j.scitotenv.2020.143168
2022	LCSQA/INERIS — Rapport	Programme CARA : Synthèse des principaux résultats (2008-2020)	Synthèse décennale	LCSQA
2022	LCSQA/INERIS — Note technique	Cahier des charges pour l'étalonnage des ACSM	ACSM / QA-QC	LCSQA
2023	LCSQA/INERIS — Rapport	Exploitation des six premières années de données automatiques du programme CARA (Composition chimique des PM, 2015-2021)	13 sites / ACSM / AE33 / PMF	LCSQA
2023	LCSQA/INERIS — Rapport	Performances Prev'air en 2021	CHIMERE / composition PM1	LCSQA
2023	Thèse — Université / HAL	Étude de la composition chimique des particules fines et des sources d'aérosol organique sur différents sites en France à partir de jeux de données pluriannuels à haute résolution temporelle	ACSM / AE33 / PMF	HAL tel-04903521
2024	LCSQA/INERIS — Rapport	Performances Prev'air en 2022	CHIMERE / composition PM1	LCSQA
2024	Article scientifique — Earth System Science Data	Multiyear high-temporal-resolution measurements of submicron aerosols at 13 French urban sites: data processing and chemical composition	13 sites / ACSM / AE33	10.5194/essd-16-5089-2024
2024	Communication — ACTRIS / HAL	Multi-year high time-resolution datasets of fine PM at 13 sites of the French Operational Network (CARA	13 sites / données	HAL hal-04494749

Année	Producteur — type	Titre	Thème	Référence
		program): Chemical composition and organic aerosol sources		
2024	Dataset — Zenodo / ESSD	Multi-year high time resolution measurements of fine PM at 13 sites of the French Operational Network (CARA program): data set	Jeu de données 2015-2021	10.5281/zenodo.13318298
2025	LCSQA/INERIS — Note technique	Synthèse des opérations d'assurance qualité des spectromètres de masse pour aérosols du programme CARA	ACSM / QA-QC	INERIS/LCSQA
2025	LCSQA/INERIS — Rapport	Performances Prev'air en 2023	CHIMERE / PM1 / BC	LCSQA
2025	LCSQA/INERIS — Guide méthodologique	Guide méthodologique : mesure de la composition chimique des particules submicroniques non réfractaires (NR-PM1) par ACSM – révision 2025	ACSM / référentiel	LCSQA/INERIS
2025	Guide / rapport — LCSQA / HAL	User guide for ACSM data processing and PMF application using SoFi Pro	ACSM / PMF / SoFi Pro	HAL hal-04935126
2026	LCSQA/INERIS — Rapport	Performances Prev'air en 2024	CHIMERE / PM1 / BC	LCSQA
2026	LCSQA/INERIS — Note technique	Traitement des données ACSM pour les études de sources de particules fines : recommandations pour l'application de la méthode PMF avec le logiciel SoFi Pro	ACSM / PMF	LCSQA
2026	LCSQA/INERIS — Guide méthodologique	Guide méthodologique pour la mesure du Black Carbon par Aethalomètre multi longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant (version 2025)	BC / AE33	LCSQA/INERIS
2026-2028	AASQA / projet — Projet de recherche	PFAhiStory – sélection et analyse d'échantillons historiques PM10 collectés dans le cadre du dispositif CARA LCSQA à Lyon Centre	PFAS / non ciblé / Lyon	Atmo Auvergne-Rhône-Alpes / INERIS / UPVD

Sources web

- **Atmo Auvergne-Rhône-Alpes — Surveillance réglementaire / programme CARA —** https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/surveillance-reglementaire
- **LCSQA — Exploitation des six premières années de données automatiques du programme CARA (2015–2021) —** https://www.lcsqa.org/fr/rapport/exploitation-des-six-premieres-annees-de-donnees-automatiques-du-programme-cara-composition
- **Chebaicheb et al. (2024), Earth System Science Data —** https://essd.copernicus.org/articles/16/5089/2024/
- **Favez et al. (2021), Overview of the French Operational Network (CARA) —** https://www.mdpi.com/2073-4433/12/2/207
- **Atmo AuRA — Projet PFAhiStory —** https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/etude/projet-pfahistory
- **LCSQA — Pistes d'évolution du programme CARA —** https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2018_Pistes%20evolution%20prog%20CARA.pdf