

Atelier « Bioaérosols »

Vichy, les 9 et 10 décembre 2021

Organisateurs : Y. Brunet, A.-M. Delort, G. Uzu,
sous l'égide du GT Atmosphère de l'Allenvi

Compte rendu de l'atelier

Rappel des objectifs

Pendant ces dix dernières années, la communauté scientifique a manifesté un intérêt croissant envers les « bioaérosols », c'est-à-dire les aérosols d'origine biologique comprenant des microorganismes (bactéries, archae, virus, levures et champignons), des pollens, des spores, des débris ou des excréments cellulaires (plantes, animaux, microorganismes).

Les bioaérosols présents dans l'air extérieur sont émis à partir de la surface de la Terre (océans, végétation, sols, eaux de surface), puis transportés verticalement et horizontalement sur une large gamme de distances. Ils reviennent au sol par dépôt sec ou via les précipitations (auquel cas ils ont pu servir de noyaux de condensation et intégrer les nuages). En ce qui concerne l'air intérieur, les bioaérosols sont principalement d'origine humaine ou animale (lieux de vie, élevage, industrie, milieu hospitalier, etc.). Ils peuvent également provenir d'une colonisation des matériaux (champignons) ou d'une entrée d'air extérieur.

La présence de bioaérosols a de nombreux impacts sur la physique et la chimie de l'atmosphère ; sur la santé humaine, animale et végétale ; sur le fonctionnement des écosystèmes ; sur la pollution de l'air. Leur étude est fondamentale dans de nombreux domaines. La présente épidémie de Covid-19 a mis les bioaérosols au premier plan de l'actualité.

Si les bioaérosols sont ubiquistes et intéressent de nombreux domaines de recherche (voir tableau annexé), il s'avère que la communauté scientifique travaillant sur le sujet, française pour ce qui nous concerne ici, est réduite et dispersée. Dans ce contexte, l'objectif de l'atelier est de sensibiliser à ces problématiques les communautés de recherche voisines et d'envisager avec elles dans quelle mesure pourraient être mis sur pied des programmes de recherche interdisciplinaires.

Nous avons pour cela choisi d'organiser un atelier en format restreint (25 personnes), au départ interne à l'Allenvi (membres de groupes thématiques, de groupes transversaux, de grands enjeux...), mais finalement ouvert à la communauté scientifique potentiellement intéressée, compte tenu du faible engouement des groupes de l'Allenvi.

Cet atelier visait à créer les conditions d'un dialogue interdisciplinaire permettant à la communauté scientifique de mettre en place de nouveaux formats de collaboration dans le domaine des bioaérosols, afin d'apporter des réponses à des enjeux environnementaux transversaux. Plus particulièrement, nous cherchions à :

- apporter une connaissance des enjeux que représentent les bioaérosols dans différents domaines : physique atmosphérique (formation des nuages par exemple), chimie

atmosphérique (réactivité de la phase biologique), dissémination d'organismes (écologie, colonisation d'espèces, agriculture, santé environnementale)...

- faire un état des lieux des forces de recherche en France (dans le contexte international) ;
- identifier les verrous actuels dans le domaine des bioaérosols : connaissances, méthodologie-météorologie, modélisation...

Au-delà des thématiques de recherche elles-mêmes, c'est la place du sujet dans le milieu scientifique qui est en jeu. Comment arriver à intégrer ces thématiques pluridisciplinaires dans les appels à projets ? Comment convaincre les décideurs et les financeurs ? Comment parvenir à impliquer de nouveaux partenaires stratégiques ? L'atelier visait donc également à :

- définir les freins et les leviers pour développer des actions liées aux bioaérosols ;
- renforcer la coopération pour innover dans ce domaine ;
- imaginer une stratégie permettant aux bioaérosols d'être intégrés dans des programmes de recherche financés.

L'atelier Bioaérosols s'est déroulé à l'Aletti Palace Hôtel de Vichy sur deux jours, de 9 h le jeudi 9 décembre à 14 h le vendredi 10 décembre. Il a été animé par un intervenant extérieur, Jean-Pierre Brossard (<http://collectif-par-3.org/>), spécialisé en « Conception créative » (Design thinking). Son déroulement a été rendu possible par un appui financier de l'Allenvi, que nous remercions ici.

Programme

Jeudi 9 décembre matin (8 h 30 – 12 h 30)
Préparation de la salle, accueil
Brisons la glace (15 min)
Rappel du thème du séminaire, règles, contraintes (15 min)
Faisons connaissance (40 min)
Objectif : se rencontrer en tant que personne puis en tant qu'organisation, prendre sa place dans le groupe
Immersion dans le sujet : partageons nos représentations (20 min)
Objectif : pouvoir exprimer sa vision singulière du sujet, prendre conscience de la diversité des approches selon les individus et leur spécialité (sans chercher à être d'accord ou un consensus à ce stade-là)
Pause (20 min)
Partageons nos connaissances (1 h 30)
Objectif : mettre tout le monde à niveau sur les bioaérosols à partir de trois exposés de synthèse
<ul style="list-style-type: none"> • Nature, émission, transport, dépôt (Y. Brunet) • Impacts sur les processus atmosphériques (A.-M. Delort) • Impacts environnementaux et sanitaires (G. Uzu)
Temps de questions et de débat
Pause déjeuner (12 h 30 – 14 h 00)
Jeudi 9 décembre après-midi (14 h 00 – 19 h 30)
Temps de balade en groupe (1 h 30), reprise à 15 h 30
Centrage (15 min)

Finalités attendues de l'après-midi : parvenir à un vocabulaire commun, un diagnostic partagé, une vision commune de la situation et des enjeux (acteurs incontournables, éléments sur lesquels on peut se reposer, là où il y a besoin de travailler, progresser...). Les travaux se sont faits en sous-groupes, avec restitution finale en séance plénière.
Vers une vision commune : cartographie (1 h 30)
Objectif : avoir une vision commune du sujet, partager un diagnostic sur la situation afin de créer les conditions favorables à l'émergence d'actions concrètes faisant appel aux compétences des différents GT. Pour cela, faire un état des lieux des acteurs de l'écosystème et leur implication possible.
Pause (15 min)
Vers une vision commune : freins et leviers (2 h)
Objectif : identifier les freins et leviers actuels pour développer des projets interdisciplinaires dans le domaine des bioaérosols (connaissances, méthodologie-métriologie, modélisation ?...) en se reposant sur les trois domaines exposés le matin.
Dîner et soirée libre (20h00...)
Vendredi 10 décembre matin (8 h 30 – 13 h 00)
Mise en lien (10 min)
Séance de créativité et production (3 h), pause au milieu
Méthode : le « design thinking » et ses différentes phases : inspiration/empathie, créativité (divergences), sélection (convergences), prototypage. Phase d'empathie : réflexion individuelle (centrage), puis partage en binôme sur son vécu d'une bonne coopération, dans le domaine professionnel ou personnel. Pourquoi était-ce agréable ? Efficace ? Quels sont les éléments que je peux identifier qui font que cela a bien marché ? Phase d'idéation en trois sous-groupes thématiques : Nature, émission, transport, dépôt ; Impacts sur les processus atmosphériques ; Impacts environnementaux et sanitaires. Travail d'émergence d'actions nouvelles dans les mêmes sous-groupes. Phase de convergence, toujours en sous-groupes : organisation des idées en créant des nuages de mots (post-it). Phase de « prototypage ». Pour cette dernière phase, nous avons utilisé la technique du « world café », de manière à garantir un travail pluridisciplinaire en co-construction. Chaque groupe a pu participer aux différents sujets par un système tournant de table en table. Un référent a garanti la cohérence du travail à chaque table, notamment en faisant une synthèse orale de ce qui s'était dit dans le groupe précédent, et en veillant à l'implication "ajustée" de chaque groupe. Cela a permis un véritable travail de co-construction.
Bilan et prochaines étapes (30 min)
Restitution en plénière des travaux des sous-groupes. « Les prochains petits pas » : qui fait quoi ? (positionnement des personnes présentes dans des groupes de travail).
Évaluation du séminaire (20 min)
Pause déjeuner (13 h 00 – 14 h 00)
Vendredi 10 décembre après-midi (14 h 00 – 16 h 00)
Débriefing des organisateurs

Participants

nom	prénom	institution	labo
Beekmann	Matthias	LISA	LISA
Bianco	Angelica	CNRS	LAMP/ICCF
Binet	Françoise	CNRS	Ecobio
Brunet	Yves	INRAE	ISPA
Courault	Dominique	INRAE	Emmah
Delort	Anne-Marie	CNRS	Inst. Chimie CI-F
Devineau	Stéphanie	Univ Paris	BFA
Emmanuelli	Ariane	ECL	LMFA
Freney	Evelyn	CNRS	LAMP
George	Christian	CNRS	IRCELYON
Godon	Jean-Jacques	INRAE	LBE
Hough	Ian	Univ Gren. Alpes	IAB
Lac	Christine	Météo France	CNRM
Le Pichon	Alexis	CEA	DASE
Leoz	Eva	INERIS	LCSQA
Leyronas	Christel	INRAE	Pathol végétale
Lohou	Fabienne	LAERO	LAERO
Loubet	Benjamin	INRAE	Ecosys
Monod	Anne	Aix-Mars. Univ	LCE
Perret	Laurent	ECN	LHEEA
Sarda-Estève	Roland	CEA	LSCE
Sauvage	Stephane	IMT	ACTRIS-FR
Sime-Ngando	Téléspore	CNRS	LMGE
Tulet	Pierre	CNRS	LAERO
Uzu	Gaëlle	IRD	IGE

Les participants provenaient d'une grande variété d'organismes et de thématiques. À titre indicatif figure ci-dessous un nuage de mots élaboré à partir des mots clés fournis par les participants pour définir leur activité.



Principales conclusions des différents ateliers thématiques en sous-groupes

Cartographie des acteurs

Le recensement des acteurs impliqués dans les bioaérosols a montré une grande diversité d'entités concernées par cette thématique. Au-delà des différentes classifications opérées dans les trois sous-groupes, et sans vouloir à tout prix être exhaustif, on peut distinguer les grands ensembles suivants.

Recherche : CNRS et ses instituts (INSU, INC, INEE, INSB) ou missions (MITI), universités et grandes écoles, INRAE, IRD, CNRM, CEA, IRSN, INRIA, CIRAD, IFREMER, INSERM, Institut Pasteur, INERIS, CSTB, ALLENI...

Surveillance : AASQA (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air), RNSA (Réseau national de surveillance aérobiologique), LCSQA (Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air), OQAI (Observatoire de la qualité de l'air intérieur), INRS (Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles), OSU (Observatoires des sciences de l'Univers), ACTRIS (Aerosol, clouds and trace gases research infrastructure), missions et programmes de suivi satellitaire (EUMETSAT, COPERNICUS), activités menées par certains des organismes de recherche déjà mentionnés (CSTB, IRSN), LNE (Laboratoire national d'essais)...

Opérateurs et instituts techniques : Météo France, ARVALIS, Institut de l'élevage, chambres d'agriculture, CSTB, compagnies de traitement des eaux, hôpitaux...

Agences : ADEME, ANSES, ARS (Agences régionales de santé)...

Décideurs : ministères (Santé, Agriculture...), groupes parlementaires, collectivités territoriales...

Bailleurs de fonds : UE, ANR, ADEME, LEFE, EC2CO...

Sociétés savantes et associations : Académie des sciences, Académie d'agriculture, European Aerosol Federation, The Aerosol Society, FEA (Fédération européenne des aérosols), CFA (Comité français des aérosols), ASFERA (Association française d'études et de recherches sur les aérosols), SFM (Société française de microbiologie)...

ONG : RESPIRE (Association nationale pour l'amélioration de la qualité de l'air et la défense des victimes de la pollution), France nature environnement, associations de malades...

Entreprises : VEOLIA, Bertin Technologies...

Freins et leviers

Au cours des trois ateliers menés en parallèle sur le thème des « Freins et leviers », de nombreuses propositions ont été émises. Nous n'en ferons pas ici la liste exhaustive mais nous concentrerons, en les regroupant en quelques ensembles, sur celles qui sont revenues le plus souvent.

Le frein le plus fréquemment mentionné, sous diverses formes, est celui de la dispersion du domaine scientifique des bioaérosols, caractérisé par une forte multidisciplinarité, un manque de dialogue entre disciplines et l'absence d'une cartographie de l'existant. Il en résulte une méconnaissance des acteurs, une absence de structuration de la « communauté impliquée », voire un sentiment d'appartenance inexistant à une telle communauté, par ailleurs dépourvue de leadership et ne disposant pas de guichet ou de programme bien identifié – et manquant donc de ressources.

Se rajoutent à cela (1) la perception de la complexité du domaine, avec la grande hétérogénéité et variabilité des bioaérosols, ainsi que les difficultés liées à leur modélisation ; (2) l'affirmation d'un manque de moyens humains dans un domaine perçu comme nécessitant une réorientation thématique des chercheurs ; (3) une absence de standardisation des mesures ; (4) des liens complexes ou distendus entre chercheurs, acteurs et décideurs.

Il n'est pas étonnant dans ce contexte que le levier le plus plébiscité soit celui de la communication et de la structuration, avec une mise en commun de la thématique grâce par exemple au montage d'un réseau de recherche « Bioaérosols » (type GDR, réseau inter-organismes, réseau transdisciplinaire, société savante nationale dédiée...), voire un « institut de convergence », permettant de croiser de l'information (colloques, journées ateliers, formation de jeunes chercheurs, écoles d'été/hiver...) et de favoriser le partage d'objets de recherche et de connaissance, la veille technologique et la fédération de projets.

À l'appui de cette idée sont mentionnés (1) le levier du financement (appels à projets dédiés, financements liés à l'interdisciplinarité ou au développement métrologique) et (2) l'opportunité que représente la crise sanitaire actuelle pour sensibiliser acteurs et décideurs.

Thèmes scientifiques

Nature, émission, transport, dépôt

L'atelier relatif à ces thèmes généraux s'est d'abord focalisé sur l'identification des manques de connaissance dans le domaine. Leur prise en compte et la définition des fronts de science qui en résulte a conduit le sous-groupe à structurer ses idées autour d'un schéma général de programme de recherche pluridisciplinaire.

Ce dernier se présente sous la forme de deux approches imbriquées :

- un noyau central relatif à la détermination des flux nets d'émission, dont on ne trouve dans la littérature que quelques rares exemples. Ce volet, qui demande une association forte entre physiciens et microbiologistes, implique un développement métrologique et méthodologique portant sur différentes classes de particules, typiquement : virus (1 μm), bactéries (5 μm), moisissures (20 μm) et pollen (50 μm). Il repose ensuite sur une campagne expérimentale à l'échelle locale (inférieure au km^2), suivie d'un travail de paramétrisation des flux de bioaérosols en fonction de différents facteurs (couverture végétale, météorologie, etc.) ;
- un volet englobant, à l'échelle sub-régionale (50 km typiquement), constitué à la fois d'un exercice de modélisation atmosphérique à fine échelle (type LES) et d'une campagne d'observation mettant en jeu des prélèvements atmosphériques en continu (avec mâts, drones avions, lidar, ballon captif). L'ensemble serait appuyé par des bases de données (occupation et utilisation du sol à l'échelle métrique) et des observations

environnementales (variables météorologiques, concentrations et flux en gaz et aérosols, dépôts secs et humides...).

Il s'agirait ainsi, par la combinaison de mesures de flux locales, d'observations régionales et de modélisation atmosphérique, de disposer d'un ensemble de données sans précédent permettant d'étudier les processus d'émission, de transport, de vieillissement et de dépôt de bioaérosols à une échelle adéquate. La combinaison de modélisation et d'observations atmosphériques permettrait en outre de mener de front une approche directe et une approche inverse. Bien sûr, à ce stade, il ne s'agit là que de premiers éléments de réflexion pouvant former la base d'un futur projet d'envergure.

Impacts sur les processus atmosphériques

Les impacts des bioaérosols sur les processus atmosphériques figurent parmi les thématiques les plus complexes et les moins étudiées au niveau international. L'évaluation de l'ampleur de ces impacts est limitée par un manque criant de données expérimentales et de connaissance des mécanismes impliqués.

Ces impacts concernent à la fois la microphysique (bioaérosols en tant que CCN, IN...) et la chimie atmosphérique (bio-transformation de la matière par des processus enzymatiques, alternatifs à la chimie classique). Ils peuvent être abordés de diverses manières, très complémentaires, qui illustrent bien l'aspect pluridisciplinaire du sujet (chimie, biologie, physique, modélisation).

La première approche s'appuie sur des expérimentations en laboratoire mimant au mieux les conditions atmosphériques (lumière, température, milieu) et permet d'étudier des propriétés de bioaérosols en tant que CCN, IN, biocatalyseurs. Cette approche permet de fournir les valeurs nécessaires aux modèles 0D (vitesses de réaction, température de nucléation, etc.). L'autre approche, vision de physicien de l'atmosphère, se baserait sur une classification, sans doute plus grossière, des bioaérosols et de leurs spécificités à travers des traceurs (à définir), afin d'étudier l'impact des bioaérosols dans les modèles atmosphériques.

Ces deux approches mettent bien en exergue le changement d'échelle entre les expérimentations en laboratoire et le modèle zéro-D qu'elles alimentent, d'une part, et les simulations 3D de l'atmosphère au sein desquelles les bioaérosols sont insérés dans les processus atmosphériques représentés dans leur pleine complexité, d'autre part.

Dans cet atelier ont eu lieu de longues discussions, qui se sont finalement avérées constructives en permettant de converger vers quatre questions à résoudre :

- Quelle définition exacte des bioaérosols ? Comment les classer selon leur spécificité (p. ex. pollens vs bactéries vs macromolécules, etc.) ? Quelles spécificités sont-elles importantes pour chaque type de processus atmosphérique ?
- Quels sont les milieux prioritaires à étudier ? Les physiciens de l'atmosphère doivent définir des conditions ou des processus (convection profonde, brouillards, zones arides, milieux forestiers...) pour lesquels ils suspectent les bioaérosols d'être en partie responsables de phénomènes inexplicables. Ces milieux prioritaires guideraient les expériences de laboratoire.
- Quels types de données liées aux bioaérosols faut-il acquérir en laboratoire ou sur le terrain ? Quels types de traceurs ? L'objectif étant l'intégration de ces données ou traceurs dans les modèles atmosphériques pour établir les impacts des bioaérosols sur les processus étudiés.

- Quels moyens intermédiaires sont-ils capables de combler le trou d'échelle entre les expériences de laboratoire et les modèles atmosphérique 3D ?

Un des points principaux de cet atelier a été de révéler des différences de culture disciplinaire et de niveau de connaissance des participants (grand écart entre « biologiste » par exemple et « modélisateur » à grande échelle). L'exposé qui avait eu lieu au cours de cet atelier était limité à 20 min, ce qui était clairement beaucoup trop court.

Il nous semble donc très important de mettre en place assez rapidement une ou deux journées thématiques (ou école d'été) permettant de combler au mieux ce manque de connaissances. Il est envisagé des exposés didactiques sur les différentes facettes de ces sujets complexes (biologie, chimie, physique, sciences de l'atmosphère), complétés par de nombreuses discussions permettant de répondre aux questions posées plus haut.

Impacts environnementaux et sanitaires

La discussion s'est structurée autour de l'identification des fronts de science relatifs aux impacts sanitaires pour les végétaux et l'Homme. Il s'agit de deux cibles distinctes qui vont induire des méthodes de caractérisation différentes, mais pour lesquelles les verrous sont situés au niveau de la caractérisation de l'exposition.

Les fronts de science identifiés concernent la caractérisation de la viabilité (et ensuite de l'infectiosité) des bioaérosols depuis leurs sources jusqu'aux cibles, en passant par leur transport. La caractérisation des sources, flux et réservoirs est essentielle pour qualifier les impacts, qu'ils soient sanitaires, environnementaux ou climatiques. Au sein de la science de l'exposition, la caractérisation du danger est aussi importante, comme l'établissement de doses-réponses dans le milieu aérien pour les bioaérosols (qui existent seulement pour le milieu aquatique), ainsi que la documentation des effets cocktails autant à l'intérieur du champ des bioaérosols qu'au niveau des interactions des particules biotiques et abiotiques (polluants chimiques classiques).

En termes d'actions prioritaires, des développements d'instrumentation sont à faire pour disposer de capteurs d'exposition personnelle plus fiables et de capteurs de bioaérosols en ligne, qui restent aujourd'hui très limités.

Un certain nombre de manques ont été identifiés :

- caractérisation de l'exposition, qu'elle soit sanitaire ou environnementale ;
- difficulté de manipuler des pathogènes dans des chambres atmosphériques en France ;
- représentativité des modèles de laboratoire par rapport aux comportements réels des bioaérosols ;
- caractérisation du bruit de fond pour tous les bioaérosols, permettant ensuite de définir des effets seuils ;
- manque de relation dose-réponse dans l'air pour tous les bioaérosols ;
- identification du rôle des bioaérosols dans les maladies professionnelles ;
- effets du transport et du vieillissement des bioaérosols sur la toxicité ;
- évolution des sources de bioaérosols avec les changements globaux ;
- rassemblement des communautés : sciences de la santé, du végétal, de l'atmosphère, des SHS et des mathématiques.

En conclusion

De manière générale, l'atelier Bioaérosols a été fortement apprécié par l'ensemble des participants. Les différentes séances proposées, les temps de discussion collective et les exposés introductifs ont permis de « mettre du lien » dans une communauté au départ très disparate, d'acquérir un minimum de langage commun et de partager problématiques et fronts de science. Le format lui-même de l'atelier, avec ses temps de convivialité « active » et l'utilisation de techniques particulières d'animation et d'intelligence collective, a significativement contribué à son succès. De nombreux participants ont finalement regretté l'absence d'une demi-journée supplémentaire, qui aurait notamment permis à la fois des temps de discussion collective plus importants, après les exposés introductifs mais aussi autour de questions transversales, et un temps de synthèse finale.

Certes, comme on l'a vu, il subsiste des différences de culture disciplinaire marquées, ayant pu susciter par moments des incompréhensions ; rien que de très naturel concernant un thème aussi vaste que celui des bioaérosols, qui met en jeu des processus biologiques, physiques et chimiques, ainsi qu'un grand nombre d'impacts de diverses natures.

Si les bioaérosols constituent un objet d'étude récent, ils concernent une thématique en plein essor car elle est au centre de nombreux enjeux (climatiques, environnementaux, sanitaires...). Sa structuration est devenue souhaitable, et un cadre scientifique d'actions possibles à mener a été ébauché. L'atelier nous conduit ainsi à envisager deux suites en particulier, relatives d'une part au partage de connaissances et d'autre part à une mise en réseau de la « communauté » bioaérosols.

Il nous paraît d'abord important de mettre en place une ou deux journées thématiques (ou une école d'été) permettant de partager les connaissances dans un cadre interdisciplinaire. En reprenant ce qui a été dit plus haut, on peut à cet effet imaginer des exposés didactiques sur les différentes facettes (biologie, chimie, physique, sciences de l'atmosphère) caractérisant le thème des bioaérosols, permettant d'alimenter de nombreuses discussions autour de points clés : nature des bioaérosols, milieux à étudier, données à acquérir, échelles d'investigation...

Ensuite, nous proposons de monter un réseau de recherche « Bioaérosols », avec l'appui des tutelles, sous la forme par exemple d'un GDR, qui nous semble une structure adéquate pour réunir une communauté en formation. Au-delà de la lisibilité qu'il donnerait à une communauté encore très peu structurée, un tel groupement permettrait en effet, d'une manière à la fois souple et efficace, de croiser de l'information par différents biais (séminaires, colloques, journées ateliers, formation de jeunes chercheurs, écoles d'été/hiver...), de favoriser le partage de connaissances et d'objets de recherche, d'opérer collectivement une veille technologique, de discuter de projets de recherche et de faciliter leur mise sur pied.