



**HAL**  
open science

## Colloque “ Agriculture et qualité de l’air ”

Valérie Gros, Sophie Générmont, Pauline Buysse, Carole Bedos, Raluca Ciuraru, Benjamin Loubet, Jean-François Castell, Pierre Cellier, Gaëlle Uzu

► **To cite this version:**

Valérie Gros, Sophie Générmont, Pauline Buysse, Carole Bedos, Raluca Ciuraru, et al.. Colloque “ Agriculture et qualité de l’air ”. La Météorologie, 2019, 106, pp.31-36. 10.4267/2042/70366 . hal-02619937

**HAL Id: hal-02619937**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02619937v1>**

Submitted on 9 Jul 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Colloque « Agriculture et qualité de l'air », mars 2019

Valérie Gros<sup>1</sup>, Sophie Générmont<sup>2</sup>, Pauline Buysse<sup>2</sup>, Carole Bedos<sup>2</sup>, Raluca Ciuraru<sup>2</sup>, Benjamin Loubet<sup>2</sup>, Jean-Francois Castell<sup>2</sup>, Pierre Cellier<sup>2</sup>, Gaelle Uzu<sup>3</sup>

1. Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS / CEA / Université Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, Gif-sur-Yvette
2. Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes (Ecosys), Inra / AgroParisTech, Thiverval-Grignon
3. Institut des géosciences de l'environnement, Université de Grenoble-Alpes / CNRS / IRD, Saint-Martin-d'Hères

## Résumé

De par ses nombreuses activités liées aux cultures et à l'élevage, l'agriculture est une source de polluants atmosphériques qui peuvent directement ou indirectement impacter l'environnement. Le colloque « Agriculture et qualité de l'air » s'est tenu en mars dernier à Paris et a réuni divers intervenants de la recherche académique et opérationnelle francophone pour présenter des travaux récents sur les émissions des polluants agricoles (focus sur ammoniac, composés organiques volatils, composés phytopharmaceutiques et aérosols) et sur leurs impacts sur la qualité de l'air, la santé et les écosystèmes.

L'agriculture doit faire face à un défi important : augmenter la production alimentaire (et les cultures énergétiques) pour satisfaire la demande mondiale tout en limitant son impact sur l'environnement (changement climatique, qualité de l'air, des eaux et des sols, biodiversité...). La France est particulièrement concernée par cette problématique puisqu'elle possède la première étendue de surface agricole utile de l'Union européenne et est le premier producteur agricole en Europe. Si les connaissances sur les émissions de gaz à effet de serre par l'agriculture ont beaucoup progressé, la contribution de l'agriculture aux autres polluants atmosphériques est moins bien établie, du fait notamment de

connaissances encore parcellaires sur les émissions de composés réactifs (gazeux et particulaires). Ces composés participent soit directement (polluants primaires), soit indirectement après réactions avec d'autres polluants (polluants secondaires) à la dégradation de la qualité de l'air et de l'environnement en général et au dérèglement climatique (forçage radiatif) qui impactent la santé humaine et le fonctionnement des écosystèmes (figure 1).

Le colloque « Agriculture et qualité de l'air », organisé conjointement par le laboratoire Ecosys (Inra/AgroParisTech) et le Laboratoire des sciences du climat et de

## Abstract

« Agriculture and air quality », March 2019

The multiple agricultural activities including crop cultivation and indoor livestock farming are a source of atmospheric pollutants which can directly or indirectly impact the environment. The workshop "Agriculture and air quality" was held last March in Paris and gathered researchers from both academic and operational backgrounds, who presented their recent works on emissions from agricultural activities (with a focus on ammoniac, volatile organic compounds, pesticides and aerosols) and their impact on air quality, health and ecosystems.

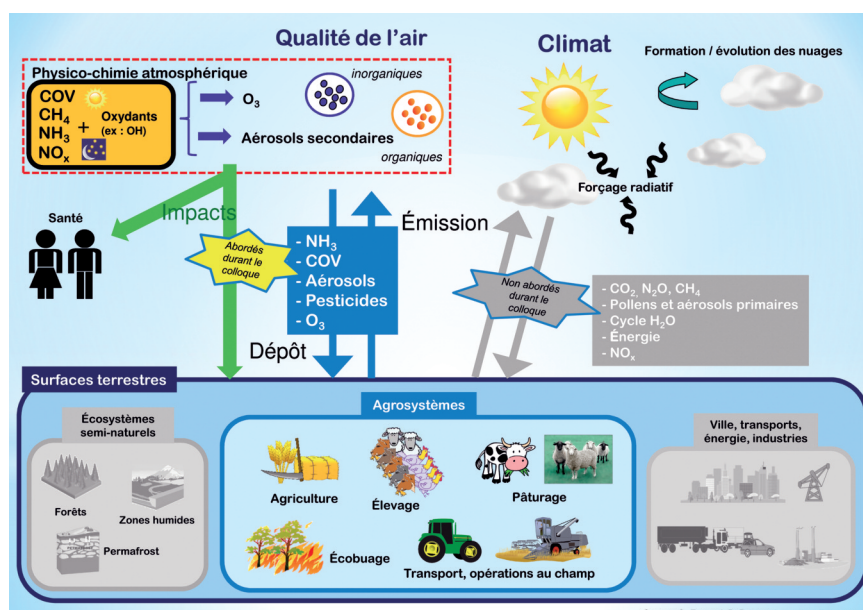


Figure 1. Schéma simplifié des sources et échanges de composés (gazeux et particulaires) entre les surfaces terrestres et l'atmosphère. Les composés et mécanismes abordés durant le colloque sont présentés en couleur ; les autres apparaissent en gris. Source : O. Fanucci, P. Buysse.

l'environnement, a eu lieu dans les locaux du siège de l'Inra à Paris les 21 et 22 mars derniers. Il avait pour objectifs de présenter des travaux récents de la communauté francophone dans le domaine de la recherche dans trois sessions, depuis les sources agricoles de polluants atmosphériques jusqu'aux impacts sur la qualité de l'air, la santé et les écosystèmes.

Une courte synthèse du colloque est présentée ici ; les lecteurs désireux d'en savoir plus peuvent consulter l'ensemble des présentations sur le site : [https://colloque.inra.fr/agriculture\\_qualite\\_air/](https://colloque.inra.fr/agriculture_qualite_air/).

## Un point sur les connaissances actuelles

### Les émissions d'origine agricole

Les émissions d'origine agricole se distinguent des émissions des autres secteurs par leur saisonnalité et leur répartition spatiale : elles sont en effet intimement liées au développement phénologique des espèces cultivées (grandes cultures, prairies, maraîchage, vergers, forêts...), ainsi qu'au stade physiologique des animaux d'élevage. Tous deux sont très dépendants des conditions environnementales (sols et climats), ainsi que des pratiques

culturelles (choix des espèces, travail des sols, apports d'intrants...) ou d'élevage (productions pour la viande, le lait, les œufs, place du pâturage au regard du temps passé au bâtiment, mode de gestion, stockage et épandage des déjections animales...). L'activité agricole conduit à des émissions tant diffuses, car liées à l'emprise des surfaces agricoles qui représentent environ la moitié du territoire français (figure 2), que ponctuelles par les bâtiments d'élevage (figure 3). Le colloque a fait un focus particulier, reflet de celui des recherches en cours, sur certains composés emblématiques de l'activité agricole.

C'est en particulier le cas de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), composé attaché quasi exclusivement au secteur agricole, qui représente 94 % des 606 kt d'ammoniac émises dans l'atmosphère par les activités humaines en 2017 en France. Plus précisément, 29 % des émissions sont liées à l'application d'engrais minéraux, 21 % à l'application d'engrais organiques, 9 % à la pâture et 41 % à la gestion des déjections des animaux d'élevage en bâtiment. Les produits phytopharmaceutiques (PPP), dont le rôle essentiel est de protéger les cultures contre différentes menaces, sont également émis majoritairement par l'agriculture. Pour ce qui est des composés organiques volatils (COV), l'agriculture représente environ 2 % des 612 kt de COV non méthaniques (COVNM) émises annuellement si seuls les processus de combustion sont comptabilisés, mais atteint 15 % si toutes les sources agricoles sont prises

en compte, pour un total s'élevant à 2 338 kt. Le méthane anthropique ( $\text{CH}_4$ ) est quant à lui issu en France à 70 % des activités agricoles pour un total de 2 195 kt. Enfin, concernant les aérosols, seuls les aérosols primaires sont comptabilisés dans les inventaires nationaux : la contribution de l'agriculture s'élève à 54 % des émissions totales des 849 kt pour l'ensemble des particules ; elle n'est plus que de l'ordre de 20 % pour les particules de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  (PM10), un peu moins de 9 % pour celles de diamètre inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$  (PM2.5) et seulement 2,6 % pour les particules de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$  (PM1). À notre connaissance, il n'y a actuellement que très peu d'études spécifiques sur les émissions d'aérosols primaires par les activités agricoles et le choix a été fait de ne présenter que des travaux sur les aérosols secondaires.

### L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ )

Les émissions d'ammoniac sont étudiées depuis maintenant plusieurs dizaines d'années et les connaissances sur leurs déterminants sont bien assises. Cependant, les études récentes confirment la difficulté de les caractériser avec précision en raison de leur grande variabilité : pour mieux cerner cette variabilité, les équipes de recherche combinent des expérimentations de terrain avec des modèles empiriques ou basés sur la description des processus. Au champ, les méthodes disponibles pour acquérir plus de références sur les dynamiques et les amplitudes des émissions se



Figure 2. (a) Épandage de fumier sur le champ cultivé qui constitue le site d'observation à long terme Icos (Integrated Carbon Observing System) de l'unité de recherche Inra-AgroParisTech du centre de Versailles-Grignon. (b) Instrumentation permettant le suivi des émissions de gaz à effet de serre et de (précurseurs de) polluants atmosphériques sur le site. Ce site est équipé depuis 2004 et permet, en collaboration avec la ferme d'AgroParisTech à Grignon, de documenter et quantifier les liens entre ces émissions et les pratiques agricoles en conditions réelles.



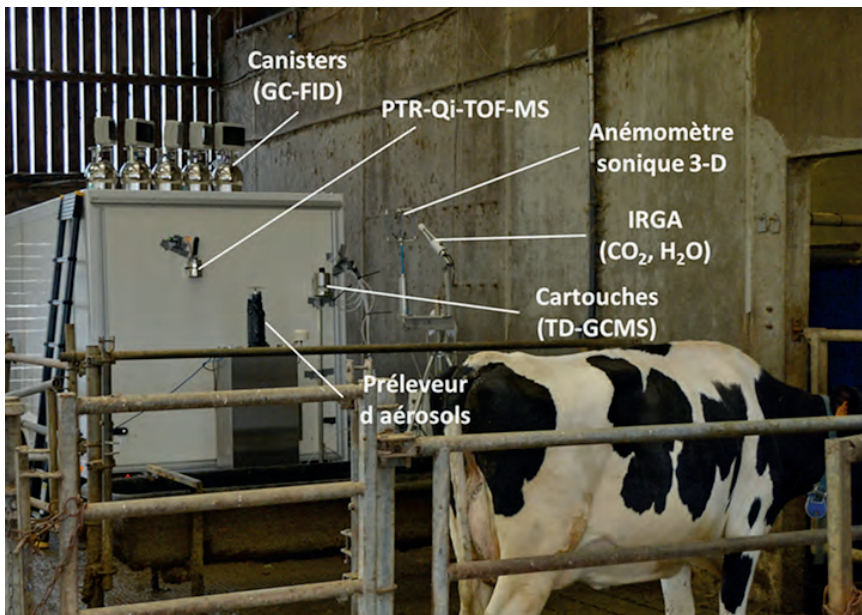


Figure 3. Remorque instrumentée pour la mesure de polluants atmosphériques dans une étable de la ferme d'AgroParisTech à Grignon. Programme Ademe Agrimultipol.

démocratisent et permettent leur déploiement en France dans des réseaux qui ont vocation à comparer les différents engrais et à évaluer les effets des pratiques d'épandage. Pour d'autres postes, comme les bâtiments d'élevage, elles sont plus difficiles à mettre en œuvre de manière fiable et adaptée aux spécificités des systèmes rencontrés.

À des échelles supérieures, des approches ascendantes (dites *bottom-up*) permettent depuis peu de décrire de la manière la plus réaliste possible les émissions françaises en combinant des informations géoréférencées sur les pratiques et les conditions environnementales aux échelles spatiales et temporelles adaptées, et l'utilisation de modèles de volatilisation. En parallèle, le développement des observations satellitaires de plus en plus précises et avec une couverture spatio-temporelle sans précédent rend possible des approches descendantes (dites *top-down*) permettant une redistribution des émissions des modèles de chimie-transport à des échelles spatiales et temporelles fines. La combinaison des approches ascendante et descendante permet d'envisager la mise à disposition auprès des utilisateurs et des décideurs publics d'outils opérationnels dans les années à venir.

### Les composés organiques volatils

Les émissions de COV biogéniques ont jusque-là été majoritairement étudiées dans des écosystèmes forestiers, mais le nombre d'études portant sur les

écosystèmes agricoles (cultures, prairies, bâtiments d'élevage) tend à augmenter et permet d'identifier les composés les plus émis et de quantifier les flux échangés entre ces (éco)systèmes et l'atmosphère. Les développements récents bénéficient d'avancées techniques majeures depuis 10 ans sur la mesure des COV par spectrométrie de masse à transfert de protons qui permettent de détecter de plus en plus de composés, grâce à l'amélioration constante de la résolution et de la sensibilité des instruments.

Les émissions de COV par les écosystèmes agricoles (cultures et prairies) sont principalement dominées par les composés oxygénés, dont notamment le méthanol, l'acétaldéhyde et l'acétone. Dans les bâtiments d'élevage, les mêmes composés sont émis (en particulier par la respiration des animaux, leurs déjections...), mais le spectre des composés émis est plus large et contient des composés azotés, comme notamment les amines. Les études réalisées montrent que la température et le rayonnement sont les deux principaux facteurs environnementaux qui pilotent les émissions de COV. Toutefois, certains paramètres tels que le stade phénologique de la végétation, la présence de maladies et de ravageurs ou une sécheresse peuvent modifier de manière significative ces émissions. En ce qui concerne les pratiques agricoles (application de produits phytopharmaceutiques, épandage de lisier, fauche, pâturage), il a été observé lors de deux études un pic d'émission de COV juste après l'opération, qui

se prolongerait au moins pendant quelques heures à quelques jours, en fonction du composé.

### Les aérosols

Les émissions de particules (aérosols) par l'agriculture sont de deux natures : (i) les émissions primaires liées au travail du sol, à la récolte, aux épandages et aux poussières issues de bâtiments, dont l'estimation reste hautement incertaine tant quantitativement que qualitativement, mais qui n'a pas été abordée dans ce colloque ; et (ii) les émissions secondaires liées à la formation d'aérosols à partir des précurseurs gazeux. La formation d'aérosols secondaires d'origine agricole n'a pas encore été comprise et quantifiée dans sa globalité. On sait que l'ammoniac contribue de façon significative à la formation d'aérosols secondaires par réaction avec les composés acides présents dans l'atmosphère et en particulier l'acide nitrique produit par les oxydes d'azote. Toutefois, les mécanismes précis de formation sont encore mal compris. Ces incertitudes pourraient donc expliquer en partie les sources « manquantes » d'aérosols dans les modèles globaux actuels. Des études combinées de la phase gazeuse et particulaire sont nécessaires afin de fournir les connaissances sur les mécanismes chimiques de formation des aérosols secondaires et d'identifier avec précision les molécules impliquées dans ces mécanismes. Par ailleurs, la composition chimique de ces particules est une propriété fondamentale déterminant leur impact sur l'environnement. Les principales interrogations portent actuellement sur la composition de l'aérosol organique, cette fraction organique représentant couramment entre 50 et 75 % de la masse totale des aérosols fins.

### Les produits phytopharmaceutiques

La contamination de l'air par les produits phytopharmaceutiques est avérée, avec des niveaux de concentrations et un nombre de composés variables selon la distance aux zones traitées et selon la période de l'année. Les émissions peuvent avoir lieu pendant l'application, par transport de gouttelettes de pulvérisation hors de la zone traitée ou après l'application par transfert gazeux du composé depuis la surface traitée vers l'atmosphère

(processus appelé volatilisation). Les méthodes expérimentales ainsi que les outils de modélisation développés ont permis d'identifier les déterminants des émissions qui sont liés aux techniques culturales, aux conditions pédoclimatiques ainsi qu'aux caractéristiques physico-chimiques des composés.

Pendant, un certain nombre de verrous de connaissances perdurent, limitant ainsi la capacité de prévision des émissions ou des niveaux de concentrations dans l'air ainsi que l'identification de leviers d'action efficaces. En effet, certains mécanismes mal compris requièrent des études complémentaires comme l'effet de la formulation des produits sur le comportement des matières actives et donc sur les émissions. De même, l'effet des nouvelles pratiques agricoles (le non-travail du sol par exemple) reste mal connu. Par ailleurs, la spatialisation des émissions repose sur une connaissance fine des pratiques (quel composé utilisé, où, quand, comment), information encore difficilement accessible. Sur ce point, l'exploitation de la base nationale de données des ventes offre une perspective très intéressante.

## Impacts

Les agroécosystèmes sont des déterminants essentiels de la qualité de l'air régionale puisqu'ils sont le siège d'émissions de polluants, souvent spécifiques, et qu'ils constituent un lieu important de dépôts secs ou humides, mais aussi de réactions chimiques formant des polluants secondaires. Cela concerne non seulement les zones rurales, mais également les zones péri-urbaines et les zones urbaines elles-mêmes. Leur rôle est particulièrement important de différents points de vue :

- La nature des polluants d'origine agricole et les impacts spécifiques qu'ils occasionnent. L'ammoniac participe à la formation de particules secondaires, à l'acidification et à l'eutrophisation des écosystèmes, ainsi qu'à la diminution de la biodiversité, tandis que les produits phytopharmaceutiques participent à de possibles impacts sanitaires (certains pouvant être cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques ou des perturbateurs endocriniens), ainsi qu'à une atteinte de la biodiversité.

- La répartition des sources, souvent diffuses mais aussi ponctuelles et couvrant l'ensemble du territoire

national. Les sources diffuses donnent lieu à des flux d'émission faibles localement, tout comme les flux de dépôt, et elles conduisent à des concentrations observées faibles, tandis que les sources ponctuelles conduisent à des niveaux d'exposition forts aux alentours.

- De par la nature biologique ou biophysique de leurs déterminants, les émissions et les dépôts sont très variables dans l'espace et le temps. Leur dépendance aux facteurs du climat et des sols ainsi que les nombreux processus en jeu et leur couplage font qu'il est difficile de contrôler ces émissions, ce qui explique en grande partie qu'elles ne décroissent pas aussi vite que d'autres émissions anthropiques. De plus, les émissions étant proches de la surface, les conséquences sur la qualité de l'air concernent des échelles pouvant être petites (quelques dizaines de mètres), mais aussi aller jusqu'à l'échelle continentale (transferts transfrontaliers d'azote ammoniacal).

## Impacts sur la qualité de l'air

Les polluants caractéristiques de l'agriculture ne rentrent pas jusqu'à ce jour dans le cadre des polluants mesurés systématiquement par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, car ce ne sont pas des polluants réglementés. De plus, des difficultés météorologiques existent : réactivité de  $\text{NH}_3$ , multiplicité des molécules phytopharmaceutiques et large gamme de leurs caractéristiques physicochimiques. Ainsi, des développements météorologiques et la mise en place de réseaux d'observation ont focalisé l'attention des chercheurs et des structures opérationnelles ces dernières années, avec le soutien des agences concernées par l'environnement et la santé (Ademe, Anses<sup>1</sup>). On cherche notamment à mieux connaître la composition chimique des particules atmosphériques et à les caractériser sur des échelles de temps courtes afin de pouvoir suivre en temps quasi réel les épisodes de pollution. Cela permet par exemple d'évaluer la contribution des aérosols à base d'ammoniac à la pollution particulaire. Un focus particulier est fait sur les zones péri-urbaines pour analyser l'impact des sources agricoles ( $\text{NH}_3$  et particules secondaires, PPP) sur la qualité de l'air urbain et la santé. La mise en place de réseaux d'observation pour des produits tels que les molécules

phytopharmaceutiques a demandé d'importantes mises au point méthodologiques et des collaborations avancées entre acteurs de la recherche en métrologie et chimie analytique (pour la mise au point des protocoles de mesure ainsi que pour l'harmonisation des mesures en termes de prélèvements mais aussi des substances actives recherchées) et les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) qui assurent le suivi des mesures et des bases de données afférentes. Des actions similaires sont en cours pour mesurer l'ammoniac en réseau.

Enfin, on cherche à améliorer la prise en compte des sources agricoles et des dépôts sur les écosystèmes dans les modèles de prévision de la qualité de l'air en raison de l'importance des surfaces agricoles dans la dynamique des polluants (émissions, dépôt). Cette tâche est rendue difficile par la nature des processus, fortement dépendants des conditions météorologiques, de la nature et de l'occupation des sols, et de la difficulté à représenter la diversité des pratiques agricole et même d'avoir accès à ces données. Au-delà de la prévision, ces modèles peuvent être utilisés pour analyser l'efficacité de divers scénarios de contrôle des émissions par la mise en œuvre des pratiques agricoles et les interactions entre polluants.

## Impacts sanitaires

L'épidémiologie environnementale impose la plus grande prudence sur l'attribution des impacts sanitaires liés aux diverses sources d'émissions de polluants. En effet, il est par exemple compliqué, d'un point de vue clinique, d'identifier les effets par type de source, car les aérosols respirés sont par essence des mélanges multisource très complexes. Il existe deux types d'approche qui tentent de répondre à cette difficulté : l'étude de la toxicité des composés majeurs ou traceurs de sources spécifiques, ou les études statistiques de déconvolution des sources par rapport à la concentration massique des particules et/ou à leur potentiel oxydant. Le potentiel oxydant est une métrique de l'exposition sanitaire en cours de développement, qui mesure la capacité intrinsèque d'un aérosol à créer un stress oxydatif dans

1. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

un milieu biologique, mécanisme clé à la base des maladies cardio-vasculo-respiratoires (asthme, bronchite, arythmie, thrombose...) attribuées à l'exposition à la pollution atmosphérique. Concernant les émissions majoritaires du secteur agricole, l'ammoniac forme du nitrate d'ammonium, dont il n'existe aujourd'hui pas de preuve formelle de toxicité (ni pour les autres espèces secondaires sulfate, AOS), et qui a un potentiel oxydant nul. Les autres composés émis par le secteur agricole, les oxydes d'azote et les COV, représentent les précurseurs principaux des particules et de l'ozone, dont les dommages oxydants à l'origine des maladies cardio-respiratoires sont démontrés. Pourtant, en moyenne, le potentiel oxydant d'aérosols provenant de sites agricoles présente les valeurs les plus basses de toutes les typologies de sites étudiées sur le territoire (sites urbains, de fond et de trafic). Ceci soulève l'hypothèse que les sites agricoles génèrent des précurseurs, mais que la formation de particules ou d'ozone responsables des impacts sanitaires se fait *ex situ*. Cette hypothèse montre toute l'importance de faire également des mesures en zones péri-urbaines impactées par l'agriculture. L'épandage d'engrais libère aussi des métaux traces. Il existe des preuves toxicologiques mais inégales en fonction des métaux testés et il est donc peu probable que les métaux de transition puissent expliquer tous les effets cardio-vasculo-respiratoires observés en épidémiologie aux concentrations ambiantes. Enfin, l'agriculture utilise des produits phytopharmaceutiques dont l'inhalation peut provoquer des pathologies respiratoires à court terme et des effets plus complexes et non complètement déterminés à long terme (maladie de Parkinson en exposition professionnelle, infertilité, perturbateurs endocriniens, baisse du quotient intellectuel, cancers...). Mais pour ces effets long terme, on considère, en l'état actuel des connaissances, que c'est la voie orale *via* l'alimentation qui serait la principale voie d'exposition pour la population (hors exposition professionnelle pour laquelle c'est la voie cutanée qui est prépondérante). Toutes ces substances sont aujourd'hui testées de façon séparée, les « effets cocktails » restants très peu documentés. Il existe un vrai besoin d'une métrique intégrative pour prévoir ces impacts sanitaires. Des développements sont en cours (comme pour le potentiel oxydant), mais nécessitent du temps.

## Impacts sur les écosystèmes

On peut considérer que les écosystèmes assurent un service de dépollution de l'air en captant les polluants atmosphériques qui se déposent à leur surface. Les données disponibles indiquent que ces dépôts sur les surfaces de végétation n'améliorent que très faiblement la qualité de l'air, notamment en zone urbaine. En revanche, les dépôts induisent souvent des effets toxiques et des perturbations des équilibres trophiques préjudiciables aux services écosystémiques fondamentaux. Les plus connus sont la réduction de la production primaire par des polluants comme l'ozone ou le dioxyde de soufre, et l'altération de la biodiversité par les dépôts acides et azotés. D'autres moins connus sont l'effet des dépôts d'aérosols sur l'efficacité d'utilisation de l'eau par les cultures. Ces impacts sont actuellement estimés au moyen de modèles plus ou moins complexes, utilisables de l'échelle du champ à celle du continent, et qui permettent notamment de quantifier les effets attendus des politiques d'amélioration de la qualité de l'air sur la santé des écosystèmes. Cependant, ils peinent encore à prévoir les effets de mélanges de polluants ainsi que leurs interactions avec les conditions climatiques et pédologiques. C'est pourquoi les outils utilisés pour quantifier les impacts des polluants sur le fonctionnement des agro et écosystèmes restent aujourd'hui trop frustes pour permettre des chiffrages réalistes. Il est donc nécessaire non seulement d'améliorer les modèles existants – le modèle de dépôt et de détoxification de l'ozone par les végétaux présenté dans cette session en est un bon exemple –, mais encore de les associer à des approches plus intégratives pour un usage opérationnel.

## Quelles perspectives ?

### Développer les mesures

Les études présentées montrent qu'il reste nécessaire de développer des mesures de pointe à la fois de concentrations et de flux d'émissions et de dépôts, en conditions de terrain ainsi qu'en conditions de laboratoire.

Les mesures de concentration sont nécessaires de l'échelle du champ à celle du continent. Elles doivent s'appuyer sur

les nouveaux instruments de pointe, comme les spectromètres de masse qui permettront de considérer un spectre plus important de composés parmi les COV, les PPP et les aérosols. Elles doivent intégrer les nouvelles données telles que les mesures satellitaires. Elles doivent non seulement être représentatives du territoire (NH<sub>3</sub> et particules en Bretagne) et des situations d'exposition (PPP), mais il est nécessaire de faire le lien entre les pratiques agricoles et les concentrations observées. Pour les familles de composés (COV, PPP, aérosols), un vrai travail de sélection des composés à suivre en fonction des objectifs poursuivis (études spécifiques, campagnes de mesures nationales, études long terme) est nécessaire.

Les mesures de flux sont également nécessaires. À l'échelle locale, elles permettront de comprendre les effets des pratiques et des conditions culturales (cultures pérennes, annuelles, type de bâtiment...), ainsi que de caractériser les effets des facteurs environnementaux (climat et sols) pour alimenter des modèles mécaniques de flux. À plus large échelle (tour, avion...), de telles mesures seront utiles pour valider les inventaires d'émission et aider à l'intégration de ces émissions dans des modèles de prévision de la qualité de l'air. Dans le cas des produits phytopharmaceutiques, la définition de protocoles standard de mesures des émissions issus de l'application et de la volatilisation permettra de disposer de références fiables. Il reste par ailleurs nécessaire de poursuivre les mesures en laboratoire qui permettent de tester de multiples conditions de sol et de produits, de détecter de nouveaux composés d'intérêt et de comprendre les processus sous-jacents afin de les intégrer dans les modèles.

Enfin, que cela soit des mesures de concentrations ou de flux, la quantification systématique des incertitudes devient essentielle.

### Mettre l'accent sur certains processus

Ce colloque a permis de pointer du doigt les processus qui sont encore mal compris. Pour les produits phytopharmaceutiques, il faut déterminer notamment l'effet de la formulation sur le devenir de ces produits et mieux caractériser la fraction émise au moment de l'application. Pour les composés organiques volatils, il conviendra d'améliorer et de développer des



modèles basés sur les processus, et de les appliquer aux écosystèmes agricoles. Pour les aérosols, même si des progrès significatifs ont été faits cette dernière décennie sur la compréhension des mécanismes de leur formation, il reste des questions sur les aérosols organiques issus des nouveaux précurseurs et tout un champ de travail est ouvert sur les interactions « organique-inorganique ». Il reste par ailleurs beaucoup d'efforts à faire pour améliorer les profils géochimiques de la source agricole d'aérosols qui est très mal contrainte dans les modèles sources récepteurs utiles pour quantifier les apports relatifs de chaque source d'émission.

En ce qui concerne l'impact sanitaire, la toxicité des particules est maintenant avérée, mais il reste à en comprendre certains mécanismes biologiques. Il faudra mesurer le nombre de particules et non pas seulement la masse, et s'appuyer sur de nouvelles mesures et la modélisation du pouvoir oxydant des particules. La caractérisation de l'exposition aux polluants pourra être faite à l'aide de nouveaux micro-capteurs ou de modèles locaux d'exposition « externe » aux gaz et particules mais aussi « internes ». Ces travaux devront également s'attacher, dans le cas des produits phytopharmaceutiques, à faire le lien entre les diverses voies d'émissions (pendant et après l'application) et l'exposition des populations.

En ce qui concerne l'impact des polluants sur les écosystèmes, il faudrait renforcer nos études sur l'effet de

l'ozone sur le stockage de carbone et initier des études sur l'effet des particules sur le fonctionnement des écosystèmes.

## À plus long terme

Un certain nombre de questions à plus long terme sont également soulevées. Tout d'abord, il s'agira d'identifier quels sont les moyens d'action mobilisables pour limiter la pollution de l'air. Et comment évaluer l'efficacité de la limitation des émissions d'origine agricole conjointement à celles des autres sources. On pense ici en particulier à l'efficacité des politiques de réduction des émissions conjointes d'ammoniac par l'agriculture et de NO<sub>x</sub> provenant essentiellement du trafic routier sur la formation des particules au printemps. Ensuite, il conviendra de comprendre quels sont les effets des changements globaux (température, stress hydrique, stress thermique...) sur les émissions et les dépôts de composés polluants tels que l'ammoniac, les COV, l'ozone, les aérosols. De même, il sera nécessaire de considérer les effets du changement d'usage des terres (agrocultures...) sur les émissions et les dépôts, et prendre en compte les évolutions liées aux marchés économiques.

Pour répondre à ces enjeux et questionnements, la modélisation sera un outil incontournable, car elle permet l'intégration des émissions dans des modèles à des échelles paysagères,

régionales ou continentale, le couplage de processus hydrologiques et atmosphériques, une prise en compte des échanges multi-espèces basée sur les processus et pourra bénéficier (via l'assimilation) de mesures à grandes échelles (données satellitaires).

Enfin, une évolution vers des approches systémiques permettant d'évaluer le rôle des rétroactions, en particulier entre l'ozone, les COV, le CO<sub>2</sub> et le climat, sera à terme nécessaire.

Quoi qu'il en soit, des collaborations soutenues entre les deux communautés scientifiques complémentaires réunies lors de ce colloque, l'une centrée sur l'agriculture et s'intéressant depuis plusieurs dizaines d'années aux émissions et dépôts de polluants vers et en provenance de l'atmosphère, et l'autre centrée sur l'atmosphère et s'intéressant plus récemment à la place de l'agriculture dans les questions relatives à la qualité de l'air, seront nécessaires pour résoudre les questions encore en suspens.

## Remerciements

Les organisateurs remercient le DIM-QI<sup>2</sup>, le ministère de la Transition écologique et solidaire et l'Agro ParisTech pour leurs soutiens financiers, ainsi que l'Ademe pour sa contribution à ce colloque qui a rassemblé de nombreux intervenants (une vingtaine) et participants (une centaine parmi plus de 150 demandes enregistrées en raison de la capacité limitée de la salle).