

Février  
2022

## **Amp'Air : Amélioration de la représentation des émissions agricoles d'ammoniac pour une meilleure prévision de la qualité de l'air en France**

Synthèse

La contribution de l'ammoniac atmosphérique à la formation de particules fines et ses conséquences sur la santé humaine sont des sujets de préoccupation croissante en matière de qualité de l'air. L'ammoniac est impliqué lors des épisodes de pollutions particulières printaniers, largement médiatisés, mais de manière tout aussi préoccupante, voire plus préoccupante, dans la pollution de fond. Or, les incertitudes sur la quantification des émissions d'ammoniac sont très élevées, tant en bilan annuel qu'en distributions spatiale et temporelle.

Les activités agricoles représentent la quasi-totalité des sources anthropiques de ce composé en France. Un peu plus de la moitié est attribuée à la fertilisation azotée des cultures, pratiquée avec des engrais de synthèse ou par recyclage de produits résiduels organiques. Et c'est la variabilité spatiale et temporelle de ces émissions qui explique une grande partie de cette variabilité. Les pratiques de fertilisation en elles-mêmes offrent de fortes disparités selon les régions et les cultures. Elles sont en outre très dépendantes des conditions météorologiques. Elles restent malgré tout particulièrement concentrées au printemps, lors de la reprise de végétation, qui coïncide avec des conditions météorologiques et atmosphériques favorables au développement de pics de pollution particulières. La volatilisation de l'ammoniac est elle aussi très dépendante de la météorologie, des conditions de sol, des types d'engrais utilisés ainsi que des modalités de leur application et des pratiques d'abattement éventuellement mises en œuvre.

Le projet Amp'Air démontre tout l'intérêt d'utiliser l'une ou l'autre de deux approches émergentes reposant chacune sur des principes très différents pour améliorer substantiellement les inventaires spatialisés et temporalisés des émissions d'ammoniac en France. L'approche NH3SAT repose sur l'optimisation des émissions par inversion atmosphérique contrainte par les observations satellitaires de concentrations en ammoniac : c'est une approche top-down. L'approche Cadastre\_NH3 combine l'utilisation du modèle mécaniste Volt'Air sur une base de données agropédoclimatiques très résolue spatialement et temporellement : c'est une approche bottom-up. Le gain de robustesse de ces inventaires a été analysé sur toute une année culturale par confrontation des concentrations d'ammoniac atmosphérique estimées à celles mesurées quotidiennement par satellites et celles acquises spécifiquement avec des capteurs et des analyseurs déployés au sol à des échelles spatiales et temporelles pertinentes.

Le projet Amp'Air montre également, que, utilisés individuellement en entrée des modèles de chimie transport Chimere ou Morage de la plateforme Prev'Air, ces nouveaux inventaires contribuent à l'amélioration de la prévision de la qualité de l'air, en termes de concentrations en particules et en particules fines. Un focus sur la période printanière caractérisée par des épisodes de pollution particulaire a montré tout l'intérêt de cette meilleure temporalisation et spatialisation des émissions, avec des alertes affinées sur les périodes de dépassement de seuils.

La combinaison de l'ensemble de ces approches promet plus de robustesse et plus d'opérationnalité : l'approche Cadastre\_NH3 peut être utilisée pour générer des inventaires très détaillés temporellement et spatialement, avec un lien fort avec les pratiques agricoles renseignées pour des années culturales précises et les conditions environnementales rencontrées ; ces inventaires peuvent ensuite être optimisés pour ces mêmes années mais aussi pour d'autres années culturales, selon l'approche NH3SAT, en utilisant les concentrations en ammoniac obtenues en continu à des échelles spatiales variées grâce à la fois aux observations satellitaires et aux mesures in situ.



## LA PROBLEMATIQUE MOTIVANT LE PROJET AMP' AIR

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est un composé gazeux émis majoritairement par les activités agricoles en France, et pour moitié environ par la fertilisation azotée des cultures pratiquée avec des engrais de synthèse ou par valorisation des produits résiduels organiques. Sa contribution à l'acidification, à l'eutrophisation et à la baisse de biodiversité des milieux naturels sur lesquels il se dépose ainsi qu'aux émissions indirectes de protoxyde d'azote, gaz à fort pouvoir effet de serre, est connue de longue date. Sa contribution à la formation de particules fines et leurs conséquences sur la santé humaine font l'objet de préoccupations plus récentes mais croissantes en matière de qualité de l'air : l'ammoniac se combine en effet avec les oxydes d'azote, principalement issus du trafic routier, et les oxydes de soufre, principalement issus des activités industrielles. Il contribue aux pics de particules fines au début du printemps. Ces épisodes printaniers de pollution aux particules, largement médiatisés, ont contribué au regain d'intérêt des politiques publiques pour l'ammoniac en France. Les émissions d'ammoniac sont donc des paramètres d'importance à prendre en considération dans la modélisation des processus physico-chimiques de formation des particules inorganiques secondaires. Un ensemble de réglementations internationales a été mis en place depuis dès 1999 (protocole de Göteborg) dans l'objectif de diminuer les émissions d'ammoniac.

Le gouvernement français a adopté, en 2017, un plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA) qui se traduit par des objectifs de réduction des émissions de 13 % en 2030 par rapport à 2005. Cependant, les évaluations des émissions d'ammoniac sont marquées par des incertitudes de 100 à 300 % des bilans annuels.

Parallèlement, depuis 2003, le dispositif de surveillance de la qualité de l'air s'est vu renforcé en France apportant à l'Etat et aux autorités locales un soutien pour gérer efficacement la pollution de l'air, et en particulier, anticiper l'occurrence d'épisodes de pollution. Les prévisions de la qualité de l'air et les cartographies des concentrations des polluants atmosphériques réglementés fournis par la plateforme nationale de prévision de la qualité de l'air, Prev'Air, sont le résultat de la conjugaison des observations in situ et de simulations numériques. Les modèles de chimie-transport permettent de prendre en compte les phénomènes de transport et de dispersion des masses d'air et les transformations chimiques influant les concentrations des polluants, connaissant les données d'émission des composés atmosphériques par secteur d'activité et pour les émissions naturelles. Ces émissions sont renseignées grâce à des inventaires. Or, les émissions au champ sont caractérisées par de fortes variabilités temporelles et spatiales qui ne sont pas toujours bien représentées dans les inventaires de référence. Ces derniers sont en effet obtenus grâce à la désagrégation spatiale et temporelle d'émissions nationales annuelles : les clés de répartition prennent en compte des paramètres d'influence moyens, non différenciés d'une région ou d'une année à l'autre. Ils ne tiennent donc pas compte de tous les déterminants de la volatilisation, comme les pratiques de fertilisations et les conditions environnementales.

Ainsi, l'ensemble de la filière de prévision peine à anticiper l'occurrence d'un épisode de pollution particulière printanier impliquant une forte participation de l'ammoniac, et tend à sous-estimer l'intensité de ces événements, la concentration en nitrate d'ammonium des particules.

Le respect des seuils d'émissions fixés par les différentes politiques publiques passe donc par la réduction des incertitudes sur les émissions d'ammoniac dans les inventaires. La principale hypothèse formulée dans le projet Amp'Air est que l'amélioration des inventaires d'émissions anthropiques d'ammoniac, en particulier l'amélioration de leurs représentations spatiale et temporelle à l'échelle de la France est indispensable à une meilleure prévision de la qualité de l'air.

L'objectif du projet Amp'Air était donc de mettre en œuvre, de confronter et de combiner de manière innovante l'ensemble des moyens disponibles tant en termes de modélisation que d'observations, pour mieux décrire la variabilité spatiale et la distribution temporelle des émissions d'ammoniac d'origine agricole, en se focalisant sur les émissions liées à la fertilisation azotée des cultures, et de les intégrer dans une chaîne de modélisation allant jusqu'à la prévision de la qualité de l'air.

Le projet Amp'Air a ainsi exploré deux nouvelles approches élaborées pour répondre à ce besoin pour les émissions d'ammoniac :

- Une approche top-down, NH3SAT, mettant en synergie les observations satellitaires de colonnes de concentrations d'ammoniac et les modèles de chimie-transport afin de contraindre les émissions issues des inventaires de référence selon une méthode d'inversion d'équilibre des masses ; ces inventaires optimisés sont disponibles depuis 2008 avec les images satellitaires IASI et 2012 avec les images satellitaires CrIS.
- Une approche bottom-up, Cadastre\_NH<sub>3</sub>, reposant sur le modèle mécaniste de prévision de la volatilisation au champ Volt'Air et une base de données d'entrée collectées à des échelles spatiales et temporelles fines. La base de donnée tire son originalité de la description ad'hoc des pratiques de fertilisation pour les années ayant fait l'objet d'enquêtes « pratiques culturales » par le service de la Statistique et de la Prospective (SSP, AGRESTE) du Ministère de l'Agriculture. Cet inventaire est donc disponible pour les années culturales 2005-2006, 2010-2011 et 2016-2017.

Les deux années culturales disponibles pour les deux approches sont relativement dissemblables en termes de conditions météorologiques et de qualité de l'air, et se révèlent donc complémentaires, permettant de consolider les résultats et les conclusions du projet. La première, du 1<sup>er</sup> juillet 2010 au 30 juin 2011, est caractérisée par le déploiement d'épisodes de pollution de fin février à fin mars 2011 ; un évènement remarquable par son ampleur géographique a même été observé sur une dizaine de jours. La deuxième année en revanche, les conditions météorologiques et atmosphériques n'ont pas été propices au déploiement d'épisodes de pollution aux particules et à la formation de nitrate d'ammonium entre le 1<sup>er</sup> juillet 2016 et le 30 juin 2017.

L'apport de ces nouveaux inventaires d'émissions d'ammoniac en entrée des modèles de chimie-transport a été évalué par confrontation des sorties de simulations aux concentrations en ammoniac et en particules observées par satellites et mesurées dans l'air ambiant. Même si cela ne répondait pas à l'objectif central du projet, l'utilisation de deux modèles de chimie transport CHIMERE et MOCAGE, mettant en œuvre des modalités différentes de traitement des composés et des modélisations différentes des processus chimiques a permis de questionner plus largement l'intérêt relatif de ces améliorations au regard de l'ensemble de la chaîne de prévision de la qualité de l'air.

Pour pallier le manque de données de concentrations en ammoniac nécessaires à cette évaluation, un réseau de mesure de concentrations a été mis en place spécifiquement et a permis de couvrir 4 régions contrastées du Nord de la France sur toute l'année culturale 2016-2017.

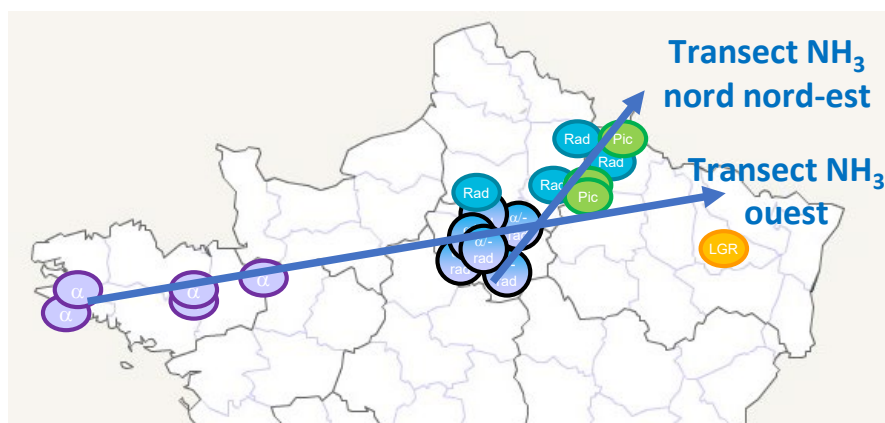
## UN RESEAU DE MESURES D'ENVERGURE : CARACTERISER LES VARIABILITES SPATIALES ET TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS AMBIANTES EN AMMONIAC

Le temps de vie dans l'atmosphère de l'ammoniac est court, de quelques heures à quelques jours : sa concentration est donc très variable dans l'espace et le temps. Très soluble dans l'eau, l'ammoniac s'adsorbe sur les parois des préleveurs et analyseurs, et ce qui complique encore plus la mesure de sa concentration. Ces difficultés expliquent en partie le retard relatif du déploiement de réseaux de mesure des concentrations ambiantes en ammoniac, malgré les besoins exprimés pour (i) la validation des estimations des émissions aux échelles d'intérêt pour la décision publique (régionale, nationale), (ii) la surveillance de la qualité de l'air, complément indispensable à sa prévision, et (iii) l'évaluation de l'efficacité de la mise en œuvre des politiques de réduction futures.

Le projet Amp'Air a contribué au déploiement d'une campagne de mesures sur plus d'une année culturale de juillet 2016 à septembre 2017 et sur une vingtaine de sites répartis sur quatre régions du Nord de la France aux climats et pratiques agricoles variés.

La démarche s'est déclinée selon plusieurs axes de travail :

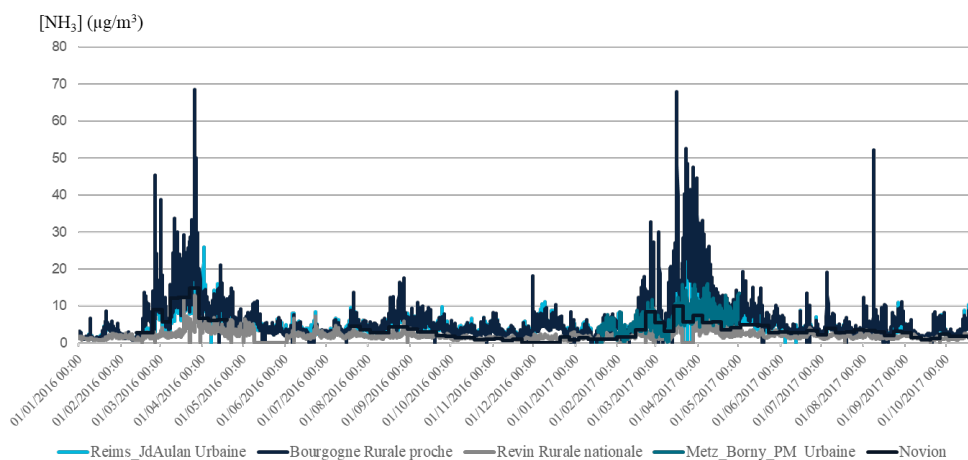
- Identification et qualification de l'existant au sein des réseaux de surveillance et des laboratoires de recherche
- Définition de la stratégie de déploiement mesures pour répondre aux objectifs du projet
- Evaluation de la comparabilité des mesures réalisées selon différentes méthodes (prélèvement à analyse différée, mesures par conversion, mesures directes, etc.) pour établir des corrélations intersites ou des tendances
- Evaluation de la représentativité aux différentes échelles spatiales et temporelles



Localisation des points de mesure de concentrations en ammoniac pour la période juin 2016-juillet 2017.

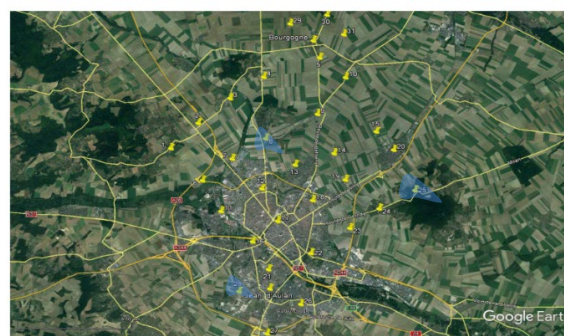
- Cercles violets* : prélèvements effectués par badge ALPHA (intégration sur 1 à 4 semaines),
- Cercles bleus* : prélèvements effectués par préleveurs Radiello (intégration sur 1 à 2 semaines),
- Cercles verts* : mesures effectuées en continu par analyseur Picarro,
- Cercle orange* : mesures effectuées en continu par analyseur Los Gatos Research.

Une base de données compile les données acquises lors de cette campagne de mesure 2016-2017 pour les concentrations en ammoniac, ainsi que d'autres observations complémentaires sur les concentrations en particules mesurées ou collectées à partir de l'existant et sur les quelques données de concentrations en ammoniac glanées pour l'année culturale 2010-2011.



*Séries chronologiques 2016-2017 des concentrations en ammoniac mesurées en région Grand-Est pour le projet Amp'Air*

Une grande variabilité saisonnière a été confirmée, avec des ratios de concentration pouvant être supérieurs à un facteur 10. Deux périodes clés sont confirmées : la première, la plus intense, correspond à la période de fertilisation accompagnant la reprise de végétation de fin d'hiver et de début de printemps ; la deuxième correspond aux fertilisation de fin d'été début d'automne, avant le semis des cultures d'hiver. En revanche, sur les périodes étudiées, la variabilité interannuelle s'est avérée faible. Les variabilités journalières ou inter-journalières quant à elles sont à mettre au regard notamment de la température de l'air, avec des ratios pouvant atteindre 1,5 pour une différence de température de 2°C. Il n'a pas été relevé de corrélation systématique entre les niveaux de concentrations en particules et ceux en ammoniac.



*Carte du secteur d'étude entre Bourgogne et Jean d'Aulan à proximité de Reims pendant la période du 22 au 24 août 2017 pour l'étude de la représentativité spatiale de la mesure de concentration en NH<sub>3</sub> représentant en rouge (à gauche) les zones présentant les plus fortes teneurs en NH<sub>3</sub> et en bleu (à droite) les zones présentant les teneurs les plus faibles*

Concernant la variabilité spatiale, la variabilité horizontale est faiblement marquée en l'absence de source notable, avec des ratios inférieurs à 1,5. Elle est très marquée en présence d'une source dans un périmètre pouvant excéder une centaine de mètres. La variabilité verticale, quant à elle, est faiblement marquée sur des hauteurs classiques de prélèvement, inférieures à 4 mètres, et en l'absence de source avérée.

Concernant les choix météorologiques à opérer pour l'évaluation des niveaux de fond, en l'absence de sources et en dehors des périodes d'épandages agricoles, les méthodes passives intégrées sur 1 à 4 semaines sont bien adaptées, le choix des sites devant se faire au regard de l'inventaire des sources et en veillant à s'écarter des axes routiers dont l'impact semble avéré sur la campagne. Pour l'évaluation de la variabilité temporelle, les méthodes optiques directes restent le choix à privilégier et le choix du site est à adapter à l'objectif.

Le projet Amp'Air a ainsi contribué à la réflexion sur le déploiement de réseaux de mesure de concentrations en ammoniac et a nourri en partie le travail du LCSQA concernant l'établissement d'un guide de recommandations pour sa mesure (<https://www.lcsqa.org/fr/rapport/guide-methodologique-pour-la-mesure-des-concentrations-en-ammoniac-dans-lair-ambiant>), travaux qui serviront également à l'établissement de la stratégie nationale de surveillance de l'ammoniac applicable en France à compter de 2023.

## NH3SAT : DES INVENTAIRES DYNAMIQUES SPATIALISES « TOP-DOWN » MOBILISABLES RAPIDEMENT ET EN CONTINU

Ces deux dernières décades ont vu un fort développement de l'observation de la composition chimique de l'atmosphère par télédétection satellitaire avec de plus en plus de composés atmosphériques mesurés. L'ammoniac en est un des exemples emblématiques. Sa colonne troposphérique est mesurée en tout point du globe une fois par jour avec une résolution de l'ordre de la dizaine de km par deux instruments : l'instrument français IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) à bord des satellites européens Metop et l'instrument américain CrIS (Cross-track Infrared Sounder) à bord du satellite américain Suomi-NPP (National Polar-orbiting Partnership). Ces deux instruments ont des capacités de cartographie des émissions agricoles d'ammoniac de l'échelle globale ainsi que de détection et de suivi de point source, permettant, depuis quelques années, d'avoir une couverture spatiale inatteignable par des capteurs classiques. Un jeu de données sans précédent est donc disponible depuis 2008 pour IASI et 2012 pour CrIS, données distribuées généralement assez rapidement après la mesure.

Les produits IASI et CrIS présentent des sensibilités à l'ammoniac différentes, avec des concentrations environ deux fois plus élevées pour CrIS que pour IASI. Ces différences peuvent être expliquées par (i) l'utilisation d'algorithmes différents pour estimer les colonnes atmosphériques d'ammoniac, (ii) l'application de filtres plus restrictifs pour IASI (10 % de couverture nuageuse) que pour CrIS (30%), (iii) ainsi que des heures de passage conduisant à un contraste thermique faible à 9h30 pour IASI et plus fort à 13h30 pour CrIS.

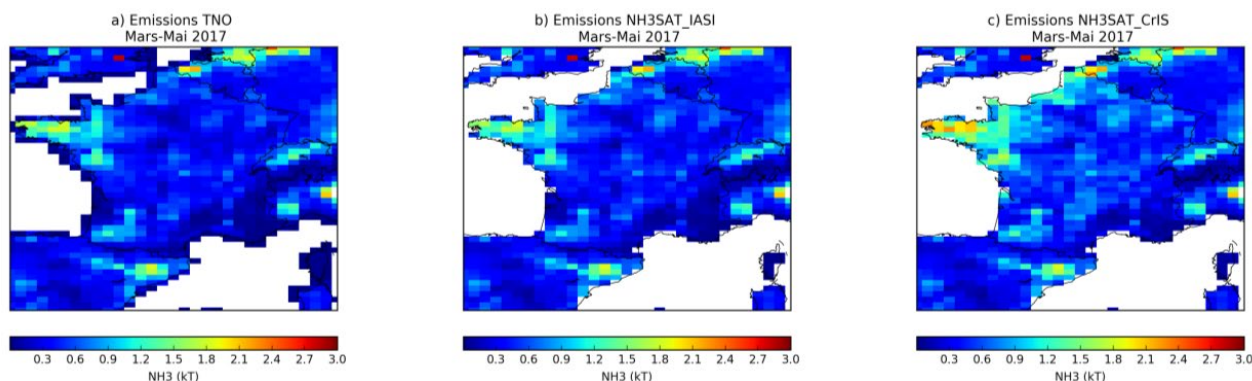
Ces données ont été utilisées dans le projet Amp'Air pour contraindre les inventaires de référence d'émissions d'ammoniac.

Les méthodes d'inversion atmosphérique, aussi appelées top-down, se sont en effet développées dans le même temps que l'observation de la composition chimique de l'atmosphère depuis l'espace. Ces méthodes mettent en synergie observations et modèles de chimie-transport afin de contraindre les émissions issues des inventaires de référence utilisées en entrée des modèles. Des approches plus ou moins sophistiquées existent. La méthode d'inversion utilisée dans le projet Amp'Air est une méthode d'équilibre des masses basée sur le modèle de chimie-transport Chimere. Elle est appliquée à moyenne résolution spatiale ( $0,5^\circ \times 0,25^\circ$ ), adaptée aux espèces à courte durée de vie comme l'ammoniac : le transport d'une maille à l'autre du modèle et la chimie à l'intérieur de la maille sont ainsi négligés.

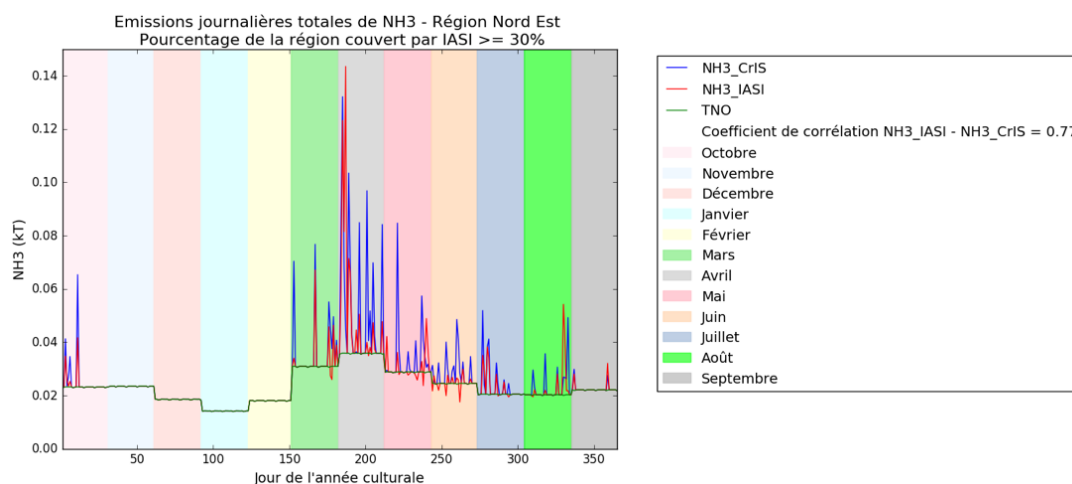
Pour chaque jour et en chaque point de grille pour lesquels la couverture nuageuse le permet, la différence relative entre les colonnes atmosphériques simulées et celles observées est calculée à l'heure du passage du satellite. Cette correction est appliquée uniformément pour toutes les émissions du jour considéré : la correction obtenue est donc journalière et à la résolution spatiale du modèle. Pour les cas où les observations ne sont pas disponibles, les émissions sont laissées à la valeur de l'inventaire de référence.

Les inventaires sont ainsi optimisés pour l'année culturale 2010-2011 avec IASI (NH3SAT\_IASI\_2010-2011) et pour l'année culturale 2016-2017 avec IASI (NH3SAT\_IASI\_2016-2017) et avec CrIS (NH3SAT\_CrIS\_2016-2017) dans le projet Amp'Air. L'analyse se focalise sur les deux périodes printanières (2011 et 2017) où les fertilisations azotées jouent un rôle déterminant dans les émissions.

La structure spatiale des corrections apportée est cohérente à la fois entre les deux types de données satellitaires pour l'année 2016-2017, notamment pour les plus fortes valeurs, et entre les deux années d'étude, confirmant la robustesse de l'approche.



D'une manière générale, les inventaires top-down NH3SAT suggèrent que les **émissions** sont sous-estimées par l'inventaire de référence utilisé par les modèles de qualité de l'air, aussi bien en 2010-2011 qu'en 2016-2017. A l'échelle nationale, l'inventaire NH3SAT\_IASI conduit à des émissions environ 10 % supérieures à l'inventaire de référence : 13 % pour 2010-2011 et 8 % pour 2016-2017. L'inventaire NH3SAT\_CrIS conduit à des émissions beaucoup plus fortes, de 43 % supérieures à l'inventaire de référence. A l'échelle des régions, les deux inventaires NH3SAT montrent une augmentation substantielle des émissions dans la région Nord-Est de la France : + 35 % pour NH3SAT\_IASI\_2010-2011, + 20 % pour NH3SAT\_IASI\_2016-2017 et + 55 % pour NH3SAT\_CrIS\_2016-2017.



*Émissions journalières de NH<sub>3</sub> pour une zone du Nord-Est de la France issues de l'inventaire de référence TNO (vert) qui ne présente pas de variabilité journalière, NH<sub>3</sub>SAT\_IASI (rouge) et NH<sub>3</sub>SAT\_CrIS (bleu). Seuls sont représentés sur la figure les jours pour lesquels la couverture de la région Nord-Est était supérieure à 30 % avec les observations IASI*

Les inventaires NH<sub>3</sub>SAT donnent également des informations sur la **temporalité des émissions**, analysée aux échelles mensuelle et journalière. Là-aussi, les deux périodes clés sont confirmées, au printemps et à l'automne. Les observations satellitaires analysées à l'échelle mensuelle montrent des colonnes d'ammoniac plus fortes au Nord-Est de la France en mars et une augmentation des colonnes observées de Mars à Avril au Nord-Ouest de la France, suivie d'une diminution générale en mai. Ces variations saisonnières se traduisent par des émissions maximales en mars dans les deux régions Nord-Est et Nord-Ouest en 2011 pour NH<sub>3</sub>SAT\_IASI alors que l'inventaire de référence montre une dynamique plus faible des émissions au printemps avec un maximum atteint en avril pour les deux régions. En 2017, la dynamique des inventaires est plus faible d'un mois à l'autre par rapport à 2011. Le maximum des émissions est visible en avril pour tous les inventaires pour les deux régions. Cette différence entre les mois de mars et avril d'une année à l'autre peut être expliquée par des différences de conditions agropédoclimatiques impactant directement les processus des émissions. Notons toutefois que le mois de mars 2017 est plus affecté par la couverture nuageuse, conduisant à un sous-échantillonnage des émissions avec les satellites.

L'information accessible à l'échelle journalière des deux inventaires NH<sub>3</sub>SAT permet de révéler des pics d'émissions à des échelles temporelles plus fines, même s'il faut garder en tête que la succession de pics peut être partiellement liée à la succession de jours nuageux et de jours clairs. Par exemple, les deux inventaires mettent en évidence de forts pics d'émissions au début du mois d'avril 2017 dans la région Nord-Est. Par ailleurs, l'inventaire NH<sub>3</sub>SAT\_CrIS montre une variabilité journalière plus marquée que NHE\_IASI, avec des pics plus nombreux et plus intenses sur l'ensemble de la période.

Cette méthode NH<sub>3</sub>SAT montre un **vrai potentiel** pour renseigner (i) globalement les activités émettrices et mieux évaluer les bilans globaux des émissions d'ammoniac, toutes origines confondues, (ii) la distribution spatiale des émissions et mieux refléter les différences d'émission entre les régions, ainsi que (iii) la temporalité des émissions de manière plus spécifique à chaque année, à l'échelle mensuelle en particulier, en dehors des périodes de trop forte couverture nuageuse, reflétant plus finement la temporalité des activités agricoles. Elle permet ainsi de mieux représenter les effets locaux et instantanés des paramètres influençant l'ensemble des émissions de tous les secteurs d'activité et réduire l'incertitude des inventaires. Elle ne fournit cependant pas d'informations sur les sources sous-jacentes des émissions (fertilisation, élevage, autres secteurs), ni sur les choix techniques et cultureux, comme la date de fertilisation, le niveau de fertilisation, le type d'engrais utilisé, etc., comme peut le faire une méthode bottom-up.

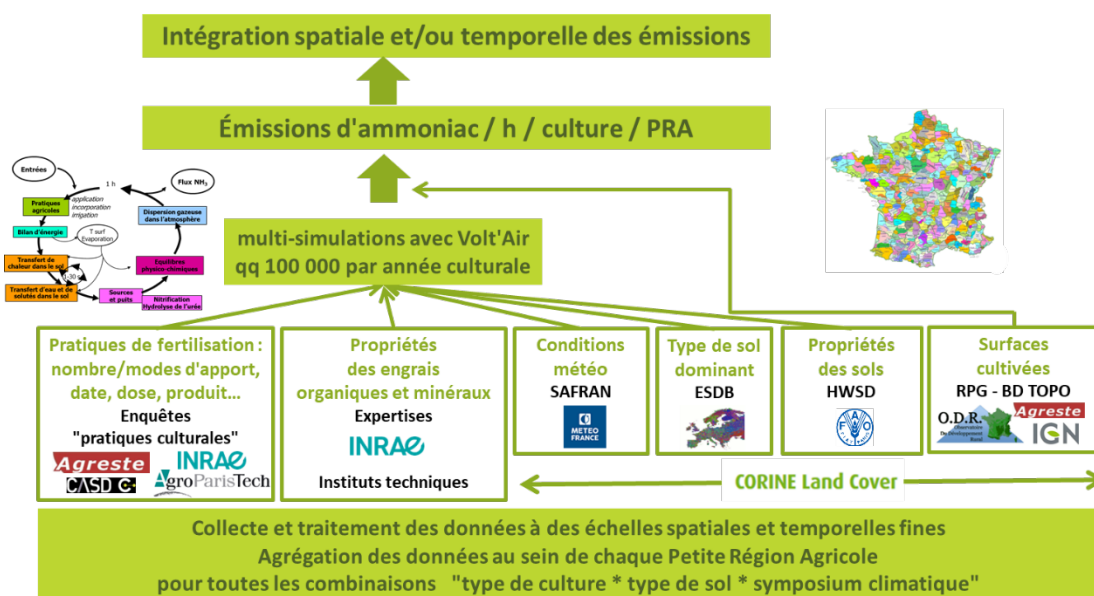
# CADASTRE\_NH<sub>3</sub> : UN INVENTAIRE DYNAMIQUE SPATIALISE « BOTTOM-UP »

## EXTREMEMENT RESOLU ET RICHE EN INFORMATIONS

Les inventaires d'émissions atmosphériques de référence d'un composé reposent sur la connaissance des données de la quantité de chacune des activités qui contribuent aux émissions d'ammoniac croisées avec les facteurs d'émission spécifiques à chaque activité, pour une période de temps donnée. Les facteurs d'émission sont généralement issus de synthèses de données expérimentales. Pour l'ammoniac, les données d'activités sont établies sur la base de la connaissance du cheptel pour chaque espèce (nombre d'animaux), les quantités d'azote ammoniacal excrété et les modes de gestions des déjections animales au pâturage, au bâtiment, au stockage et à l'épandage ; s'y ajoute la connaissance des tonnages des autres produits résiduels organiques valorisés en agriculture et celui des différents engrais de synthèse commercialisés en France, ainsi que des méthodes d'application et d'abattement mises en œuvre globalement, à l'échelle de la France. Ces inventaires sont robustes mais ne permettent pas de restituer les variabilités temporelles et spatiales observées entre régions, voire entre petites régions, ou entre années. Ils ne tiennent donc pas compte de tous les déterminants de la volatilisation, comme le détail des pratiques de fertilisations et les conditions environnementales.

Spatialiser et temporaliser les émissions d'ammoniac avec une approche bottom-up suppose de pouvoir combiner deux types de ressources décrites avec des niveaux de complexité compatibles l'un avec l'autre. C'est ce qui est proposé dans le projet Amp'Air à un niveau très détaillé et très spécifique à la France pour les sources qui expliquent a priori la plus grande variabilité temporelle des émissions d'ammoniac : les émissions au champ après fertilisation azotée, pratiquée avec des engrais de synthèse ou par recyclage de produits résiduels organiques. Le modèle mécaniste de volatilisation Volt'Air est substitué aux facteurs d'émission classiquement utilisés dans les inventaires nationaux d'émission, dans l'objectif de refléter la variabilité des émissions d'ammoniac en regard de la variabilité des conditions agropédoclimatiques rencontrées dans la pratique agricole française. Une base de données ultra-résolue spatialement et temporellement est constituée pour renseigner, d'une part, les données de cette activité avec précision dans toute sa gamme de variabilité, et, d'autre part, les variables et paramètres d'entrée du modèle Volt'Air pour une année culturale : les propriétés du sol, les conditions météorologiques et les pratiques de fertilisation azotée. L'originalité de l'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> ainsi construit repose à la fois sur la description réaliste de ces pratiques de fertilisation azotée et sur la modulation des émissions selon leurs déterminants locaux et instantanés.

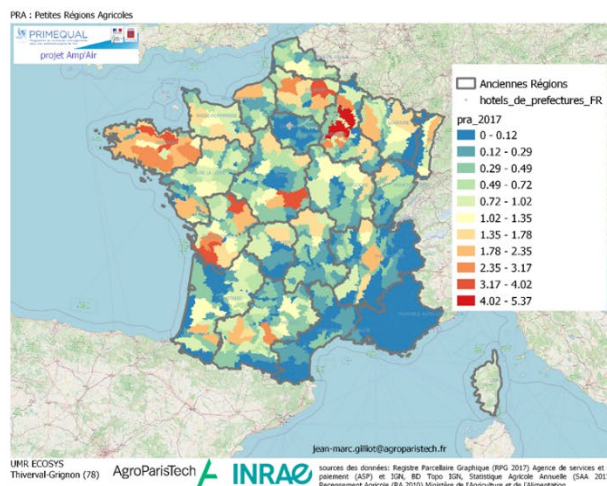
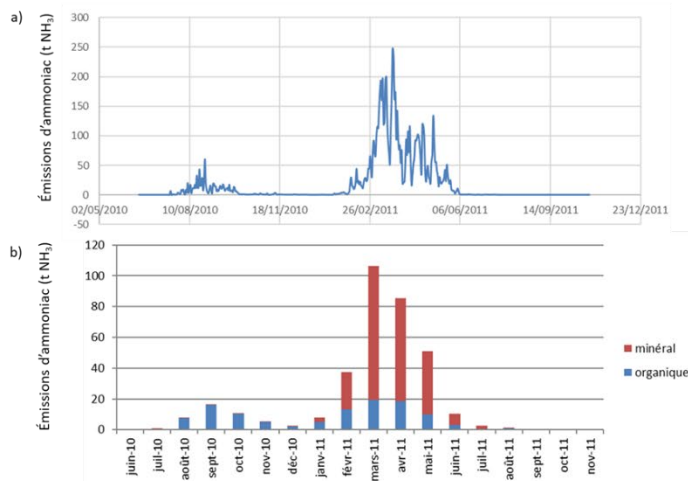
L'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> est conçu comme une plateforme de simulation : plusieurs centaines de milliers de simulations du modèle Volt'Air sont réalisées à l'échelle de la France pour une année culturale, de la fin de l'été d'une année civile à l'automne de l'année civile suivante. La base de données associée contient l'ensemble des informations sources et l'ensemble des sorties des simulations, à des échelles d'espace et de temps variées : de la petite région agricole à la France, de l'heure à l'année. Les données géo-référencées d'entrée de l'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> ont nécessité la mobilisation de plusieurs bases de données, et leur mise en cohérence. Les types de cultures et leur surfaces respectives sont décrites spécifiquement pour chaque année culturale et chaque petite région agricole. Les informations sur les pratiques de fertilisation (date, dose, forme, mode) sont obtenues par une analyse spécifique des données d'enquêtes pratiques culturales Agreste du Ministère de l'Agriculture à l'échelle de la région pour chacune de trois années culturales pour les grandes cultures et prairies (2005-2006, 2010-2011 et 2016-2017), pour l'année culturale 2012-2013 pour le maraichage et la viticulture, et pour l'année culturale 2014-2015 pour l'arboriculture. Les propriétés physiques et physico-chimique des engrais apportés influençant la volatilisation d'ammoniac sont décrites grâce à l'expertise des organismes de recherche et des instituts techniques agricoles. La description des conditions de sol rencontrées a mobilisé une carte des sols croisée avec une base de données de leurs propriétés. La description à un pas de temps horaire des conditions météorologiques prévalant lors de l'évènement de volatilisation simulé sont issues du modèle SAFRAN de MétéoFrance.



Outil Cadastre\_NH<sub>3</sub>



Les résultats générés par la mise en œuvre de l'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> permettent de **décortiquer les différents natures des déterminants** qui jouent sur les dynamiques, les intensités, les cumuls et les distributions spatiales des émissions d'ammoniac en France. Une mine d'informations obtenues sur plusieurs années en termes de pratiques fertilisations et d'émissions permet d'évaluer les contributions respectives des cultures, des types d'engrais, des pratiques agricoles, des différentes zones géographiques caractérisées par des conditions environnementales locales de sol et de météorologie, etc. Le projet Amp'Air met en exergue, par exemple, l'impact de la proximité entre l'agriculture et l'élevage sur les types de cultures implantées et sur la place du recyclage des effluents d'élevage sur les pratiques de fertilisation, et, ainsi, sur les déterminants de la volatilisation de l'ammoniac au champ.



*Dynamique des volatilisations d'ammoniac générées par l'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> pour l'année culturale 2010-2011 pour la France entière (a) moyennées sur des semaines glissantes à partir des données horaires ou (b) agrégées sur une base mensuelle*

*Carte des cumuls d'émission d'ammoniac liées aux fertilisations au champ, en kt NH<sub>3</sub> par Petite Région Agricole, estimées avec l'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> pour l'année culturale 2016-2017 (total France des émissions au champ : 310 kt NH<sub>3</sub>)*

Presque toutes les **surfaces fertilisées** reçoivent un ou plusieurs apports d'engrais de synthèse, alors que les fertilisations avec des engrais organiques concernent un plus petit nombre de parcelles, avec, très généralement, un seul apport.

Sans surprise, la **culture** contribuant le plus aux émissions d'ammoniac est le blé tendre, suivi du maïs grain, et du maïs fourrage.

Le **taux de volatilisation des engrais** de synthèse est légèrement plus faible que celui des engrais organiques, relativement aux quantités d'azote apportées, effet combiné de la proportion d'azote sous forme ammoniacale et du taux de volatilisation de cet azote ammoniacal. Néanmoins, des disparités très fortes selon les types d'engrais et au sein d'un même type d'engrais sont observées en relation avec les propriétés contrastées des engrais ainsi que l'expression des effets des conditions agropédologiques d'application.

En résulte une **hiérarchisation des contributions des engrais aux émissions d'ammoniac en France** : la solution azotée conduit à la part la plus élevée, suivie par l'urée, engrais de synthèse le plus émissif. Entre les années culturales 2010-2011 et 2016-2017, la contribution de la solution azotée diminue au profit de l'urée, reflet des évolutions récentes des marchés des engrais, amplifié par les différences de potentiels de volatilisation. Les fumiers de ruminants, forme très majoritaire des effluents d'élevage de l'agriculture française, arrivent juste après, en raison d'un faible taux de volatilisation. Les lisiers porcins, produits en plus faibles volumes que dans les autres pays Européens, n'arrivent qu'ensuite, suivis par l'ammonitrate, engrais de synthèse le moins émissif.

Cette approche « bottom-up » est pertinente pour représenter finement les **disparités spatiales des émissions**, et apporter les explications des déterminants des sources en cause, directement liées aux pratiques de fertilisation, aux conditions de sol et/ou aux conditions météorologiques. Une illustration est donnée avec le « croissant » de fortes émissions se situant à cheval sur la Champagne-Ardenne et la Picardie, et corroborant les observations satellitaires. L'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> permet d'en analyser l'origine : les sols calcaires, à pH alcalins, conduisent à des volatilisations élevées, d'autant plus élevées que l'engrais le plus apporté sur les cultures est la solution azotée, engrais non seulement sensible à la volatilisation mais aussi particulièrement sensible aux effets du pH du sol sur la volatilisation.

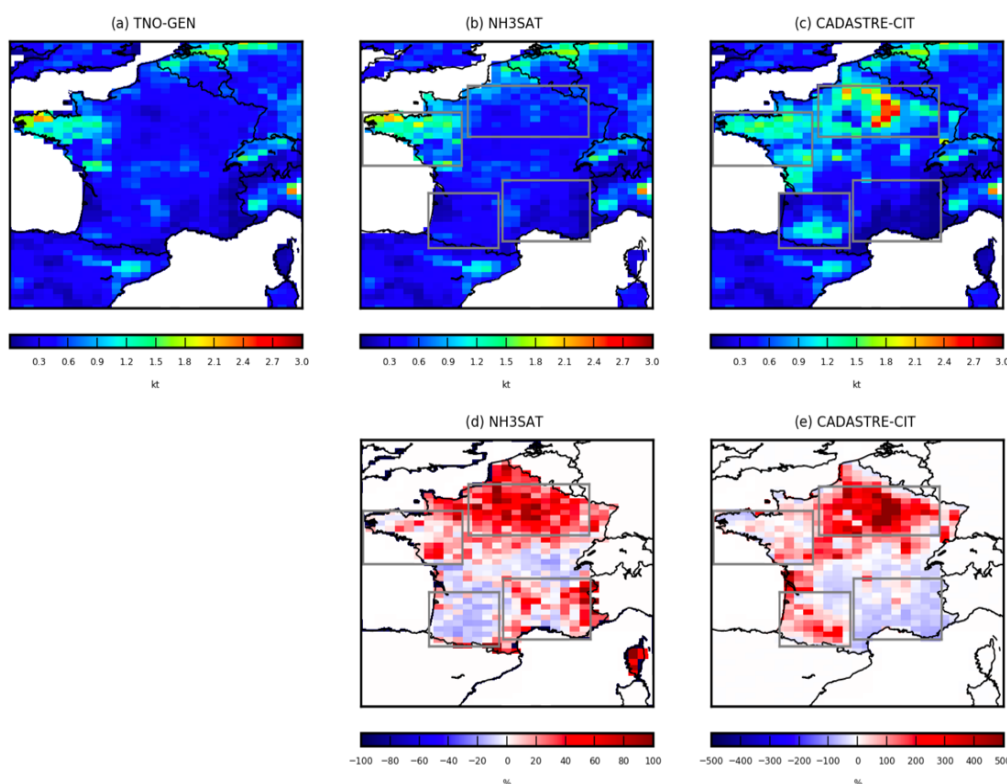
L'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> renseigne aussi avec précision la **temporalité des émissions**, à des échelles mensuelles et infra mensuelles. Les engrais organiques contribuent de manière dominante aux fertilisations et aux émissions d'automne, alors que la part des engrais de synthèse devient majoritaire au printemps, mais de manière différenciée selon les régions : la contribution du recyclage des effluents d'élevage est d'autant plus forte que l'élevage est prégnant. Le maximum des émissions est bien atteint au mois de mars en 2010-2011, mais est moins différencié entre mars et avril pour 2016-2017, reflétant des variations interannuelles en accord avec les observations satellitaires. Là aussi des disparités régionales sont observées : le pic d'émissions de mars est plus marqué dans les régions du Nord de la France où les cultures d'hiver dominant, moins dans les régions d'élevage, et ne l'est pas dans les régions où les cultures de printemps et/ou d'été dominant.

Les résultats de ces simulations présentent un **fort potentiel d'utilisation** : estimation de la part agricole dans la pollution diffuse et dans les pics de pollution ; actualisation des facteurs d'émission nationaux ou régionaux des engrais, selon les cultures et/ou les saisons ; actualisation des facteurs d'abattement ; identification des bonnes pratiques et évaluation des leviers de réduction.

## PREV'AIR : INTEGRATION DES NOUVEAUX INVENTAIRES PORTEUSE D'AMELIORATIONS

L'intégration à l'inventaire Cadastre-CIT des émissions issues de l'outil Cadastre\_NH<sub>3</sub> pour le poste de valorisation au champ des effluents d'élevage et la fertilisation azotée a été complétée pour les autres secteurs : une approche top-down a été conservée, même pour les émissions d'ammoniac des autres postes de la gestion des effluents de l'élevage (pâturage, bâtiments d'élevage, stockage et transformation). Mais dans ce cas, une distribution spatiale dépendante de celle du cheptel et une distribution temporelle fonction des conditions météorologiques effectivement rencontrées ont été adoptées.

La fusion d'un inventaire avec un autre inventaire, comme celle réalisée avec succès dans le projet Amp'Air, n'est pas une opération sans risque au regard des simulations des modèles de chimie transport et en particulier des équilibres réactionnels de l'ensemble des espèces chimiques et des particules en jeu. Des simulations ont été réalisées avec les deux modèles de chimie-transport Chimere et Mocage dans leurs configurations opérationnelles, c'est-à-dire celles utilisées dans le cadre de leur production quotidienne de prévision de la qualité de l'air, pour les deux années culturales. Les résultats montrent que la substitution aux inventaires de référence des émissions d'ammoniac établies soit sur la base de l'approche top-down par inversion à partir des observations IASI et CrIS, soit sur la base de l'approche bottom-up couplée aux émissions des autres secteurs d'activité (approche top-down) est assez stable et n'affecte pas la qualité des simulations.

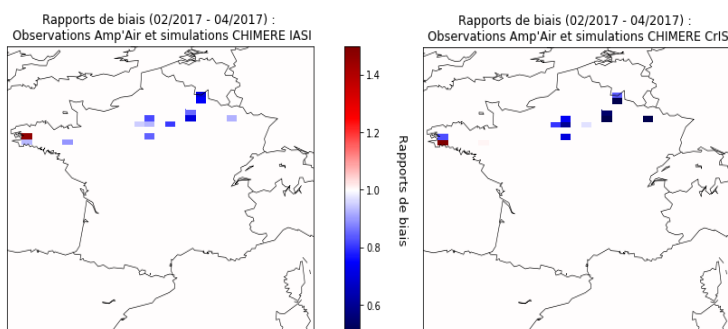


Cartes du bilan printanier d'émissions d'ammoniac obtenues pour chaque point de grille, en ktNH<sub>3</sub>, de mars à mai 2011 pour les inventaires (a) de référence (TNO-GEN), (b) NH<sub>3</sub>SAT IASI et (c) CADASTRE-CIT.

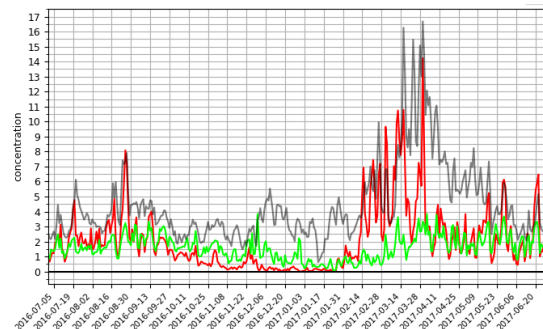
Cartes des différences relatives entre les émissions des inventaires (d) NH<sub>3</sub>SAT\_IASI et (e) CADASTRE-CIT et les émissions de l'inventaire de référence, en %, pour le printemps 2011. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13481-2020>

L'inventaire CADASTRE\_CIT conduit lui-aussi à des **émissions plus fortes** que celles de l'inventaire de référence au niveau national, et particulièrement dans le Nord de la France, mais de manière plus marquée que l'inventaire NH<sub>3</sub>SAT\_IASI (+ 51 % en 2011), se rapprochant de l'inventaire NH<sub>3</sub>SAT\_CrIS. Dans la moitié Sud, l'accord entre CADASTRE-CIT et NH<sub>3</sub>SAT\_IASI n'est pas bon mais concerne des émissions plus faibles. Globalement, **les deux approches convergent sur la représentation spatiale et temporelle des émissions d'ammoniac** pour les deux années malgré la divergence des situations, que ce soit ou non en présence d'un pic de pollution.

L'intégration des inventaires alternatifs conduit à une **diminution des concentrations** en ammoniac par rapport à l'utilisation de l'inventaire de référence, diminution plus ou moins prononcée selon les régions (très localement les écarts peuvent atteindre 5 à 7 µg/m<sup>3</sup>) et plus ou moins avérée selon les saisons. L'amélioration significative concerne aussi **l'évolution des concentrations en ammoniac dans l'année**. C'est tout particulièrement en période d'épandage que les nouveaux inventaires conduisent à de meilleures performances d'estimations des concentrations, où elles sont nettement accrues (jusqu'à 10 µg/m<sup>3</sup> sur une large partie des régions Grand-Est et Hauts de France) et plus proche des mesures. C'est en particulier le cas pour NH<sub>3</sub>SAT\_CrIS et CADASTRE-CIT, pour lesquelles les valeurs de concentrations peuvent doubler voire tripler.



Cartes des rapports de biais calculés pour le printemps 2017 pour les concentrations en ammoniac simulées à l'aide des inventaires NH3SAT\_IASI (à gauche) et NH3SAT\_CrIS (au centre)



Séries temporelles des moyennes de concentrations en ammoniac ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) des stations de mesure en 2016-2017 : observées en gris, pour la simulation de référence avec Chimere en vert et pour la simulation CADASTRE-CIT avec Chimere en rouge

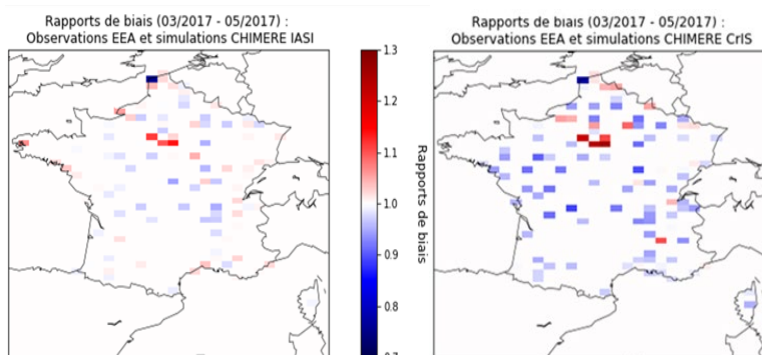
Les diminutions ou augmentations de concentrations en particules par rapport aux simulations avec les inventaires de référence ont un lien assez évident avec les celles constatées de concentrations en ammoniac. Le lien reste toutefois indirect, et la non linéarité de la contribution de l'ammoniac à la formation des particules explique les différences entre les sources d'émission étudiées. Les zones d'augmentation et de diminution des concentrations de  $\text{PM}_{10}$  sont bien co-localisées pour les deux modèles de chimie-transport, Chimere et Mocage. Néanmoins, la réponse de Mocage est significativement plus faible, la différence de comportement entre les deux modèles s'expliquant par la différence de traitement des aérosols (aérosols organiques secondaires, vieillissement ou transferts de masse, etc.)

La simulation CADASTRE-CIT accroît ainsi la sous-estimation des concentrations moyennes sur l'année en  $\text{PM}_{10}$  sur quasiment toutes les régions. Néanmoins, en restreignant l'évaluation sur une période à forte activité d'épandage (mi-février à fin mars), ses performances sont meilleures, que ce soit en présence ou non d'un épisode marquant aux particules. Au printemps 2011, la production de  $\text{PM}_{10}$  est en moyenne plus élevée sur la moitié nord du pays, et légèrement plus intense sur l'agglomération parisienne ( $\sim +10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  avec Chimere en 2010-2011, soit 15 à 20 % de particules supplémentaires). A l'opposé, la partie Sud, et surtout la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, voit une diminution assez significative des concentrations de  $\text{PM}_{10}$  sur cette période ( $-20\%$  autour de l'agglomération marseillaise pour Chimere).

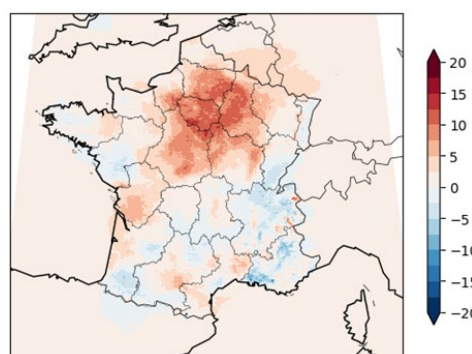
Au total sur les treize régions, CADASTRE-CIT améliore les performances sur huit régions (en particulier au Nord) et détériore légèrement les scores sur trois régions (plus au Sud). L'effet sur les scores de  $\text{PM}_1$  est lui aussi plutôt positif mais très peu marqué.

De la même manière, lorsque les inventaires NH3SAT\_IASI sont utilisés en période de plus fortes émissions, au printemps 2011 ou 2017, les améliorations pour les  $\text{PM}_{2,5}$  sont générales sur l'ensemble de la France. Elles atteignent même 10 % dans la région Nord-Est et en Ile de France rien que pour le mois de mars 2011, marqué par une succession d'épisodes particuliers. En revanche, l'utilisation des inventaires NH3SAT peut aussi ponctuellement détériorer les performances des simulations, comme au printemps 2017 dans la région Ile de France.

Cette étude prouve donc la sensibilité de la production de  $\text{PM}_{10}$  aux émissions de  $\text{NH}_3$ , malgré la complexité des processus impliqués, et montre une sensibilité variable selon les régimes de qualité de l'air et entre modèles de chimie-transport. Ainsi, même si l'impact sur les concentrations en particules est lui plus modeste que sur les concentrations en ammoniac, et surtout bénéfique sur l'épisode imposant de mars 2011, la prise en compte des inventaires dynamiques spatialisés augmente la pertinence des simulations à détecter les dépassements de seuils réglementaires, ce qui est très important pour la prévision de la qualité de l'air. Ces travaux d'évaluation concluent donc à un intérêt de l'utilisation des inventaires NH3SAT et Cadastre\_NH3 dans les chaînes de prévisions de la qualité de l'air.



Cartes des rapports de biais calculés pour le printemps 2017 pour les concentrations en  $\text{PM}_{2,5}$  simulées à l'aide des inventaires NH3SAT\_IASI (à gauche) et NH3SAT\_CrIS (au centre)



Différences de concentration moyenne des  $\text{PM}_{10}$  en relatif (%) entre la simulation CADASTRE-CIT et la référence sur la période du 15 février au 31 mars 2017 avec Chimere

## AMP'AIR : UNE DEMARCHE EPROUVEE ET PROMETTEUSE

Ce projet prouve l'intérêt de l'utilisation des approches top-down NH3SAT et bottom-up Cadastre\_NH3 en production opérationnelle dans les plateformes de prévision de la qualité de l'air, particulièrement en période d'épandage. Leur utilisation serait aussi un atout dans le cadre du renforcement du suivi des concentrations d'ammoniac par la modélisation grâce à une spatialisation et temporalisation des émissions plus en adéquation avec les pratiques agricoles. Cette étude démontre l'intérêt réciproque de disposer de mesures de concentrations ambiantes en ammoniac pour comprendre le lien entre émissions et concentrations simulées.

La complexité d'élaboration de l'inventaire bottom-up Cadastre\_NH3 interroge néanmoins sur son applicabilité opérationnelle pour la prévision de la qualité de l'air et doit motiver la déclinaison de ce type d'approche par des solutions flexibles et adaptables par rapport aux conditions météorologiques et aux évolutions des pratiques agricoles. L'outil Cadastre\_NH3 est en effet un outil lourd à mettre en œuvre par la richesse des données d'entrée. Son grand avantage est qu'il fournit les informations sur les sources des émissions. L'utilisation du modèle Volt'Air sur ces données ultra-résolues en fait un outil très puissant. Il permet de disséquer les différents éléments d'un changement de pratiques dans un contexte de changements globaux en soulignant/calculant leurs importances relatives, ce que ne permettent ni les inventaires de référence, ni les inventaires NH3SAT. La solution de métamodèles évaluée à l'intersection des trois projets EvaPRO, EvaMIN et Amp'Air avec des méthodes statistiques et d'apprentissage est certainement l'une des réponses à cette limite. En revanche, l'accessibilité aux données d'enquêtes sur les pratiques culturales, leur analyse ainsi que la question de l'interpolation entre les années pour lesquelles les enquêtes sont disponibles restent un verrou.

Notons que la mise en cohérence des secteurs d'activité les uns avec les autres reste nécessaire et suppose des démarches analogues pour les autres postes de gestion des déjections animales, au pâturage, au bâtiment et au stockage.

L'applicabilité opérationnelle est plus évidente pour les méthodes NH3SAT : elle réside dans ses raccourcis méthodologiques et techniques, qui permettent de faire abstraction de la difficulté d'accès à certains types de données. En outre, à l'inverse des données de pratiques de fertilisation, les observations satellitaires des instruments IASI et CrIS sont acquises en continu et elles sont distribuées généralement assez rapidement après la mesure, permettant beaucoup de réactivité. Cependant, la caractérisation de la variabilité journalière des émissions de l'inventaire top-down est entachée d'incertitudes induites par la couverture nuageuse. Or les émissions d'ammoniac à l'échelle quotidienne sont une donnée nécessaire pour la modélisation du transport chimique et de la formation des particules et donc de la qualité de l'air. Pour répondre à cette limite, la différence d'heures de passage entre IASI et CrIS peut être considérée comme une opportunité et l'utilisation combinée des deux types d'observations un atout : elle permettra a priori de mieux intégrer la dynamique diurne de la volatilisation d'ammoniac, très en phase avec celle des variables météorologiques et micrométéorologiques de surface. Avoir recours aux méthodes variationnelles plutôt qu'à un simple ajustement permettrait aussi certainement d'aller plus loin.

Malgré les différences fondamentales de principe entre les deux approches évaluées, les utilisations d'inventaires d'émissions orientés processus ou d'inventaires d'émissions sous contrainte d'observation montrent des cohérences intéressantes en termes de distributions spatiales et temporelles prescrites.

Tous ces éléments militent pour l'utilisation combinée de l'ensemble de ces approches : l'approche Cadastre\_NH3 pourrait être utilisée pour générer un inventaire très détaillé temporellement et spatialement, en lien étroit avec les pratiques agricoles observées en discontinu sur quelques années culturales ainsi que les conditions environnementales effectives ; l'inventaire serait ensuite optimisé chaque année selon la démarche d'inversion atmosphérique NH3SAT sur les concentrations ambiantes en ammoniac ; les concentrations seraient issues à la fois des observations satellitaires obtenues en continu, et des mesures au sol à des échelles spatiales variées, dès que des réseaux de mesure distribués spatialement et accessible à des échelles journalières seront disponibles. La continuité des informations, la robustesse des estimations et l'opérationnalité des outils seraient ainsi garanties pour une insertion dans la chaîne de modélisation du dispositif Prev'Air.

Néanmoins, les évaluations d'inventaires réalisées dans le projet Amp'Air montrent que les biais entre les simulations et les observations ne sont pas uniquement imputables à des défauts d'inventaires, de représentation des émissions agricoles d'ammoniac, mais aussi à des choix de modélisation ou des verrous de représentation des processus de transfert et des réactions des **modèles de chimie-transport**. Une étude mettant en cohérence les travaux menés dans les projets Ammon, Amp'Air et PolQA mobilisant plusieurs modèles de chimie-transport sur plusieurs inventaires, permettrait de générer un ensemble de simulations délimitant les gammes de réponse potentielles et maximales.

Cependant, la question n'est pas uniquement la qualité de la prédiction dans l'absolu, qui pourra être garantie à terme grâce aux optimisations sur les concentrations, mais aussi le potentiel des outils à être mobilisés dans les processus d'**aide à la décision en appui aux politiques publiques**. La plus-value d'une chaîne de modélisation reposant au moins en partie sur l'outil Cadastre\_NH3 par rapport aux méthodes existantes est qu'il permet de faire entrer dans la temporalisation et la spatialisation des éléments en lien avec les leviers mobilisables individuellement ou en combinaison les uns avec les autres, tout en prenant bien en compte les effets des conditions environnementales locales et instantanées. C'est ainsi que pourront émerger et être évaluées, comme cela a été fait dans le projet PolQA, les actions les plus cout-efficaces adaptées aux différents contextes agricoles, géographiques et climatiques aussi bien locaux et ponctuels que globaux.

## RÉSUMÉ

Améliorer les inventaires d'émissions vers l'atmosphère est un enjeu pour une meilleure prévision de la qualité de l'air. Le projet Amp'Air a exploré deux nouvelles approches élaborées pour répondre à ce besoin pour l'ammoniac : une approche top-down, NH3SAT, mettant en synergie le jeu de données sans précédent d'observations satellitaires de concentrations d'ammoniac et des modèles de chimie-transport afin de contraindre les émissions ; une approche bottom-up, Cadastre\_NH<sub>3</sub>, reposant sur le modèle de volatilisation Volt'Air et une base de donnée particulièrement originale par sa description des pratiques de fertilisation.

L'apport de ces nouveaux inventaires en entrée des modèles de chimie-transport Chimere et Mocage a été évalué par confrontation des sorties de simulations aux concentrations en ammoniac et en particules mesurées dans l'air ambiant. Un réseau de mesure de concentrations a été mis en place spécifiquement à cette fin pour l'ammoniac et a permis de couvrir quatre régions contrastées du Nord de la France sur toute l'année culturale 2016-2017.

Le projet Amp'Air fait la démonstration qu'affiner la temporalisation et la spatialisation des émissions est un atout pour les plateformes de prévision de la qualité de l'air pour mieux anticiper l'occurrence et l'intensité des épisodes printaniers de pollution particulaire. La convergence de ces deux inventaires alternatifs, indépendants et complémentaires, incite à poursuivre les développements en les combinant entre eux et avec des concentrations mesurées in situ pour encore plus de fiabilité.

Les travaux entrepris dans ce projet pourraient se poursuivre pour proposer des simplifications garantissant l'opérationnalité nécessaire à la mise en œuvre en routine de tels outils.

### Ce document est diffusé par l'ADEME

#### ADEME

20, avenue du Grésillé  
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1660C0013

Projet de recherche coordonné par Sophie Générumont  
INRAE UMR EcoSys  
Appel à projet de recherche : APR PRIMEQUAL  
Agriculture et Qualité de l'Air 2016

Coordination technique - ADEME : PIERART Antoine  
Ingénieur Agronomie-Environnement  
Service Forêts, Alimentation, Bio-économie

### CITATION DE CETTE SYNTHÈSE

**GENERMONT Sophie, ARTETA Joaquim, COUVIDAT Florian, CRUNAIRE Sabine, DUFOSSÉ Karine, DUFOUR Gaëlle, EL MSAYRYB Abdellatif, FORTEMS-CHEINEY Audrey, GILLIOT Jean-Marc, MELEUX Frédéric, 2022.** Amp'Air : Amélioration de la représentation des émissions agricoles d'ammoniac pour une meilleure prévision de la qualité de l'air en France. Synthèse de projet, convention ADEME 16600C0013. 12 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.