



HAL
open science

Les échanges sol-plante-atmosphère: Déploiement de l'approche résistive pour la modélisation, l'étude des processus et la mesure des échanges d'ammoniac, d'ozone et de pesticides

Erwan Personne

► To cite this version:

Erwan Personne. Les échanges sol-plante-atmosphère: Déploiement de l'approche résistive pour la modélisation, l'étude des processus et la mesure des échanges d'ammoniac, d'ozone et de pesticides. Milieux et Changements globaux. Université Paris-Saclay, 2022. <tel-03736645>

HAL Id: tel-03736645

<https://hal.science/tel-03736645v1>

Submitted on 22 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.



HAL Authorization

Les échanges sol-plante-atmosphère

*Déploiement de l'approche résistive pour
la modélisation, l'étude des processus et
la mesure des échanges d'ammoniac,
d'ozone et de pesticides*

**Habilitation à diriger des recherches
de l'Université Paris-Saclay**

Spécialité :

Sciences de la Terre, du Climat, de l'Environnement et des Planètes

présentée et soutenue à Paris, le 2 juin 2022, par

Erwan PERSONNE

Composition du jury

Jean-Christophe CALVET Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts, CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS	Rapporteur
Hervé LE TREUT Professeur, Université Paris-Sorbonne, Polytechnique, IPLS	Rapporteur
Karine SARTELET Directrice de Recherche, Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique Ecole des Ponts ParisTech	Rapporteuse
Bertrand BESSAGNET Directeur de Recherche, European Commission Energy, Transport and Climate Directorate	Examineur
Nathalie DE NOBLET Directrice de Recherche CEA, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement Pr Consultante AgroParisTech	Examinatrice
Bruno PEUPORTIER Directeur de Recherche, Ecole des Mines Paris, Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes	Examineur

Les échanges sol-plante-atmosphère de polluants atmosphériques.

Déploiement de l'approche résistive pour la modélisation, l'étude des processus et la mesure des échanges d'ammoniac, d'ozone et de pesticides

Mots clés : échanges biosphère-atmosphère, modèle résistif, ammoniac, ozone, pesticide,

Résumé :

Les pollutions atmosphériques sont une problématique sociétale depuis de nombreuses années. D'un point de vue scientifique, les questions inhérentes à ces pollutions restent actuelles car la compréhension des mécanismes à l'origine des pollutions de l'air est encore incomplète, ce qui empêche une évaluation précise de ses effets ou de ses causes. Dans ce contexte, l'un des efforts scientifiques à développer porte sur l'étude des mécanismes au niveau de l'interface entre la biosphère continentale et l'atmosphère qui représente une source ou un puits de composés, voire les deux à la fois.

Le socle pour bâtir des réponses aux questions posées est fondé sur le couplage des mécanismes d'échanges d'énergie, d'eau et de polluants gazeux entre les couverts (éco ou agro-systèmes) et l'atmosphère. Les recherches résumées dans ce rapport précisent le déploiement des travaux de modélisation et de mesures, avec une approche dite résistive, pour améliorer la compréhension et la quantification des flux entre la biosphère et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle, avec un intérêt particulier sur l'ammoniac, l'ozone et les pesticides.

L'originalité du travail réside dans le couplage des échanges entre énergie, eau et composés gazeux et la généralité de l'approche pour traiter des échanges des composés gazeux d'ammoniac, d'ozone et de pesticides.

Les perspectives de ce travail sont décomposées en deux axes de travail. Un premier axe est centré sur l'échelle de la parcelle mais avec une extension des études à des surfaces plus complexes telles que les parcelles de vignes ou les zones humides et en continuant d'élargir le spectre de composés gazeux étudiés, en premier lieu les composés organiques volatils qui jouent un rôle majeur dans le domaine de la pollution atmosphérique et de ses effets indirects sur l'effet de serre additionnel. Le second axe porte sur une extension du travail à des espaces urbains et périurbains pour tenir compte de l'artificialisation des surfaces de la biosphère. C'est d'abord à l'échelle des quartiers urbains que les premiers travaux sont engagés mais l'objectif est d'aborder à moyen terme l'organisation et la modification des usages des surfaces de la biosphère sous l'angle de la pollution atmosphérique et des changements climatiques. Cet axe de recherche répond à de nombreux enjeux : de la lutte contre l'augmentation de l'amplitude thermique et d'extension spatiale de l'îlot de chaleur urbain ou de l'îlot de pollution atmosphérique aux conséquences agronomiques ou écologiques de ces îlots, amplifiées souvent par le dérèglement climatique.

The soil-plant-atmosphere exchanges.

Resistive approach for modelling, process investigation and measurement of ammonia, ozone and pesticide exchanges.

Keywords : Biosphere-atmosphere exchanges, resistive model, ammonia, ozone, pesticide

Summary :

Air pollution is a societal issue for many years. From a scientific point of view, the questions inherent to this pollution remain current because the understanding of the mechanisms at the origin of air pollution is still incomplete, which prevents a precise evaluation of its effects or its causes. In this context, one of the scientific efforts to be developed concerns the study of mechanisms at the interface between the continental biosphere and the atmosphere, which represents a source or a sink of gaseous compounds, or both.

Providing answers to the questions posed is based on the coupling of energy, water and gaseous pollutant exchange mechanisms between the canopy (eco or agro-systems) and the atmosphere. This report specifies the modelling and measurement studies, with a so-called resistive approach, to improve the understanding and quantification of fluxes between the biosphere and the atmosphere at the field scale, with particular interest in ammonia, ozone and pesticides.

The originality of this work is in the coupling of energy, water and gaseous compounds and the genericity of the approach to deal with exchanges of gaseous compounds such as ammonia, ozone and pesticides.

The perspectives of this work are divided into two research lines. The first remains at the field scale, but with an extension of the studies to more complex surfaces such as vineyards or wetlands, and by continuing to broaden the spectrum of gaseous compounds, primarily volatile organic compounds, which play a major role in the issue of atmospheric pollution and its indirect effects on the additional greenhouse effect. The second research line involves extending the work to urban and peri-urban areas to take account of the artificialization of the biosphere's surfaces. Initial studies are being carried out at the urban canyon scale, but the objective is to address the organisation and modification of the uses of biosphere surfaces from the perspective of atmospheric pollution and climate change. This line of research responds to many issues: from the struggle against the increase in thermal amplitude and spatial extension of the urban heat island or the island of atmospheric pollution to the agronomic or ecological consequences of these islands, often amplified by climate change.

Erwan Personne

Maître de conférences hors-classe

UFR Physique de l'Environnement et Régulations Biologiques des Echanges

Département SIAFEE (Sciences et Ingénierie Agronomiques, forestières, de l'Eau et de l'Environnement)

AgroParisTech, Université Paris-Saclay

U.M.R ECOSYS, Ecologie Fonctionnelle et Ecotoxicologie des Agro-Ecosystèmes

AgroParisTech-INRAe, Université Paris-Saclay

A Bertrand N.

Remerciements

Les premiers remerciements vont aux personnes avec qui j'ai pu travailler dans l'équipe Eco&Phy de l'UMR ECOSYS. Sans cet esprit d'équipe, cette bonne humeur, ce partage d'interrogations ou de connaissances, je n'en serais pas là et que ce soit le personnel administratif, les techniciens ou les chercheurs et enseignants-chercheurs, ils ont tous contribué à ce travail à leur manière.

Plus spécifiquement, Benjamin L, Carole B., Céline D., Brigitte D., Baptiste E., les Olivier F. et Z., les Alain F. et P., Sophie G., Raïa M., Patrick S. et Andrée T., ils sont mes « co-équipiers » réguliers des recherches pour les expérimentations ou la modélisation. Pour l'enseignement qui continue de me faire vibrer, et je trouve que ça compte dans la vie de la recherche, je profite de ce paragraphe pour souligner la qualité du formateur qu'a été Jean-Francois pour moi, le « libéro » de l'UFR. Bien sûr, Benoit, Sebastien et le « petit jeune » Patrick sont mes acolytes pour aller de l'avant dans ces liens que nous cherchons à bâtir entre recherche et formation. Notre très bonne entente a permis la création de nombreux modules, parfois même à marche forcée (n'est-ce pas Sébastien !) et pour des aventures au départ incertaines (n'est-ce pas Benoit puis 'M2.CLUES@' !)

Toute cette histoire d'HDR ne serait pas d'actualité si je n'avais pas intégré en 98 la « chaire de bioclimatologie » à l'issue de ma thèse. Je ne saurais pas mieux remercier Alain Perrier qu'en lui montrant que j'ai réussi à devenir un « bon chercheur ». Peut-être que cette HDR est une preuve ; en tout cas, j'ai appris de lui la nécessité de bien comprendre, avec des approches mécanistes et bien sûr, tout ce qui touche à l'ETR, l'ETPp, l'EP, l'EP*, l'ETM, et toutes les subtilités des échanges d'eau dans le « continuum SPA ». C'est ici un petit clin d'œil pour tous nos cours sur l'évapotranspiration !. Dans cette équipe « Chaire », il y a Andrée T. et Olivier Z. qui ont été les piliers de la recherche de la chaire pendant les dix premières années. Andrée m'a appris l'indispensable de la turbulence tandis qu'Oliver est l'ingénieur pilier qui m'a donné les bases pour programmer. Heureusement que ces deux-là étaient là.

J'ai eu la chance d'avoir deux directeurs d'UMR avec qui j'ai concrètement travaillé, Pierre Cellier et Enrique Barriuso. Le premier m'a aidé à respirer l'ammoniac et l'ozone et le second, ce sont les mains dans les pesticides qu'il m'a mises, avec celles de Carole bien sûr.

Comment remercier Jean Roger-Estrade, Président de département à AgroParisTech, non spécialiste de mes thématiques mais, en cornac expérimenté, il a pris de son temps et sa patience pour comprendre ce que je faisais vraiment en détail, il a lu, relu et donné des pistes pour la rédaction de ce manuscrit. Quelle bravoure ou ténacité ?, je ne sais pas. « *Je te dois une invit' aux Jokers* ».

Ce travail est aussi le fruit du travail des étudiants en thèse que j'ai eu la chance d'encadrer ou co-encadrer directement. Ils ont nourri une bonne partie du document : Patrick S., Nebila L., Kristina H., Sonia LM., désormais Maria E. et des étudiants de M2 souvent brillants qui ont œuvré avec moi durant leur stage avec parfois des productions scientifiques dans des revues à comité de lecture (C Tédesco, F. Tardy et C Leborgne). J'ai choisi de focaliser ce rapport sur les échanges de polluants mais j'ai eu la chance aussi de travailler au départ sur le continuum sol-plante-atmosphère (avec une vision très « eau ») et d'échanger abondamment avec les doctorants sous la direction d'Alain P. ; Jérôme R., Asma L., Samir M., Borhan J. que je remercie tout autant.

Pour terminer, je remercie les membres du jury, Nathalie De Noblet, Karine Sartelet, Bertrand Bessagnet, Jean-Christophe Calvet, Hervé Le Treut, Bruno Peuportier qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Enfin, je remercie Stéphanie, mon épouse, Elena, Sève et Youenn mes enfants, ma petite tribu, qui savent m'apporter le bonheur nécessaire à mon épanouissement, à mes parents qui ont su m'apprendre à « penser par moi-meme » et me rendre solide et tenace, des qualités indispensables pour la recherche.

Présentation du candidat

Erwan Personne

Né le 10/04/1972 à Conflans Ste Honorine

U.M.R ECOSYS, INRAe-AgroParisTech, 78 850 Thiverval Grignon

Maitre de Conférences de l'enseignement supérieur agricole depuis 1998, Hors-Classe depuis 2014.

Etablissement : AgroParisTech, Université Paris-Saclay.

Discipline - UFR : Physique de l'Environnement et Régulations Biologiques des Echanges (*UFR PERBE*)

Département Sciences et Ingénierie Agronomiques, Forestières, de l'Eau et de l'Environnement (*SIAFEE*).

Diplômes et qualifications

- 1990 : - Baccalauréat série D (mention AB)
1991/1992 : - DEUG Biologie UPMC (mention AB, 2^{ème})
1993 : - licence de Chimie-Physique UPMC (mention AB, 32^{ème})
1994 : - Maîtrise de Chimie-Physique UPMC (mention AB, 3^{ème})
1995 : - DEA fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale UPMC- AgroParisTech – ENS (mention AB, 3^{ème}).
1998 : - Doctorat de l'école doctorale Sciences de l'environnement d'IdF, UPMC, (mention très honorable avec les félicitations du jury). « *Modélisation de la variabilité spatio-temporelle du continuum sol-plante-atmosphère ; Cas des couverts bistrates hétérogènes et épars* »
Jury : Mégie G., Perrier A., Gash J., Rosset R., Vauclin M., Lafolie F., Tuzet A..

Responsabilités exercées :

Enseignement

- 2000- 2007 : animateur UFR PERBE (département AGER puis SIAFEE).
2000- 2010 : coordinateur des enseignements de 2^{ème} année du cycle ingénieur département SIAFEE
2009- 2014 : responsable M1, master « Espaces Ressources Milieux » (master STVE AgroParisTech)
2009- 2014 : co-responsable master mention « Espaces Ressources Milieux » (1 M1, 7 parcours M2)
2015 – aujourd'hui : responsable master mention Agrosiences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêts (Université Paris-Saclay).
2015—2019 : co-responsable M1 Agrosiences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêts (Université Paris-Saclay)
2015-aujourd'hui : co-responsable M2 Climate, Land Use and Ecosystem Services
2019-aujourd'hui : coordinateur Graduate Program – Institut de Convergence CLand
2021-aujourd'hui : co-coordonateur Diplôme Universitaire Paris-Saclay « Agir pour le Climat »/DU AllCan.

Recherche

- 1999-2006 : responsable « formations internes » pour l'équipe Biosphère-Atmosphère (UMR EGC)
2009- 2018 : coordinateur «groupe mesures NH₃» au sein de l'équipe Biosphère-Atmosphère (UMR EGC puis ECOSYS)
2011 : comité scientifique european project ECLAIRE
2013- 2019 : co-coordonateur Projet Phare 4 « Développement durable des espaces périurbains » Labex BASC.
2014 : comité d'organisation Winterschool european project ECLAIRE
2015-2018 : coordinateur AAP CORTEA ADEME projet « NUAGE »
2015-2018 : coordinateur AAP Région IdF PICRI projet « Volatilisation d'ammoniac région parisienne »
2017-2019 : co-coordonateur projet « GALOP » (soutien de programme Labex BASC)
2021-aujourd'hui : co-concepteur Objet Interdisciplinaire « AllCan »

Activités collectives (actuelles) :

Membre élu du CE (depuis 2000)

Vice-président du département SIAFEE (depuis 2017)

Prix et distinctions:

Prix des techniques innovantes pour le développement du système ROSAA¹ (salon Pollutec 2010),
« Fait marquant » département E&A INRAE (développement système ROSAA ; 2010)

Publications :

27 articles de rang A (notoriété majoritairement excellente selon le site NORIA² utilisé par l'INRAE
deux dans la catégorie Exceptionnelle, une Correcte, toutes les autres Excellentes)
3 articles scientifiques à destination de la société (France)
8 chapitres d'ouvrages scientifiques
4 déclarations d'invention
1 dépôt de brevet

Guest Editor pour la revue *Frontiers In Environmental Sciences* :
Coordinateur de la special issue « *Land-Management Solutions for Managing Ecological and Energy Transitions* » - Initiative de l'Institut CLand

Implications récentes, avec responsabilité dans des projets de recherche nationaux ou internationaux

2008-2012 : projet ANR Vulnoz : co-coordination du WP2 (*exchanges above and inside the canopy*)
2012-2019 : "projet phare" labex BASC ; co-coordination « *Towards the sustainable development of Peri-Urban Areas* »
2014-2017 : projet BTÉP (ADEME AAP CORTEA); coordination pour l'équipe BioAtm (UMR ECOSYS)
2014-2016 : projet SPARTACUS (Labex BASC, soutien de « projet émergent ») ; coordination.
2015-2018 : projet NUAGE (ADEME AAP CORTEA) ; coordination.
2015-2018 : projet PICRI (Région IdF, AAP PICRI) ; coordination
2017-2019 : projet Galop (Labex BASC, AAP projet émergent) ; co-coordination.
2021-aujourd'hui : projet PAUL (H2020 EU Greendead project ; projet conjoint avec les mesures du réseau
ICOS – co-coordination des mesures sur 2 sites urbains/périurbains)
2022-aujourd'hui: Projet OASIS (Transformation des agroécosystèmes grâce à la valorisation des terres
excavées issues du BTP) – Soutien de la Banque Publique d'Investissement (BPI),
porteur privé TerraNova, Coordination pour l'UMR ECOSYS.

Encadrements récents

Participation à l'encadrement de doctorants

P. Stella. 2011 (3 publications cosignées relatives au travail de thèse).
« *Modélisation des flux d'ozone sur les couverts agricoles : prédiction et partition des dépôts stomatique, cuticulaire et sol* »
N. Lichiheb 2014 (4 publications cosignées relatives au travail de thèse).
« *Volatilisation des pesticides depuis les plantes : approche expérimentale et modélisation* »
K. Hansen 2015 (1 publication co-signée relative au travail de thèse)
« *Atmospheric ammonia concentrations and fluxes above deciduous forests* »
S. Le Mentec (thèse en cours, 2019-2022 ; 1 publication cosignée relative au travail de thèse)
/ Co-directeur de thèse (ADR 2019)
« *Modélisation de la contribution de la végétalisation urbaine à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle du quartier.* »
M. Ernst (thèse en cours, 2021-2024, 1 article soumis)
« *Impact of urbanization and urban greening on climate and air quality* »

• ¹ ROSAA : RObust and Sensitive Ammonia Analyser
• ² NORIA : NOtorité des Revues et Indicateurs d'impActs. INRAE
<https://intranet.noria.inra.fr/webUser/welcome.html?execution=e1s1>

Supervision de Post-docs

C. Petit, 36 mois, 2013-2016

C. Faliès 18 mois, 2016-2017 -

Y. Verger, 24 mois – 2016-2017

Encadrements de stages (niveau M1 ou M2) ayant conduit à une publication scientifique

F. Tardy (2014) avec 1 publication cosignée du stagiaire en 2^{ème} auteur (Personne E., Tardy F. et al 2015).

C. Tedesco (2015) avec 1 publication cosignée du stagiaire en 1^{er} auteur (Tedesco C., ..., E. Personne 2017)

C. Le Borgne (2018) – déclaration Invention cosignée en 2nd auteur (Personne E., le Borgne C., et al ... 2018)

Glossaire des acronymes des projets cités précédemment

ECLAIRE : « *Effects of Climate Change on Air Pollution and Response Strategies for European Ecosystems* »

projet européen 2011-2015. Dans le cadre du 7^{ème} programme de recherche de l'EU ; 39 partenaires européens. <http://www.eclairer.ceh.ac.uk/>

Vulnoz : « *Vulnérabilité des agro-systèmes à l'ozone : Quels risques à l'horizon 2020-2030 ?* ». projet ANR Vulnérabilité Milieux, Climat Société. 9 partenaires France.

Btép : « *Emissions gazeuses aux Bâtiments, sTockages, Epandages et Pâturages des systèmes bovins laitiers* ». Projet ADEME 2013-2017 – 6 partenaires France.

SPARTACUS : « *Surface, particules, ammoniac, zones cultivées et périurbaines* ». Projet émergent du Labex BASC. 7 partenaires dont 3 internationaux.

Labex BASC : Laboratoire d'Excellence « *Biodiversité, Agroécosystèmes, Société, Climat* ». Fédération de 14 laboratoires franciliens.

Projet Phare 4 « *Développement durable des espaces périurbains* ». Projet transversal du Labex BASC.

NUAGE : « *Test des NoUveaux dispositifs pour mieux évaluer les flux d'Ammoniac dans l'atmosphère depuis les aGrosystèmes et Ecosystèmes et interprétation de la campagne de mesures à l'échelle de la région Île-de-France* ». Projet ADEME. 3 partenaires France.

PICRI : « *Modéliser les flux d'ammoniac dans l'atmosphère depuis les agroécosystèmes à l'échelle de la région parisienne* ». Projet PICRI Région IdF. Projet combiné au projet NUAGE ci-dessus.

GALOP : « *Les impacts de l'étalement urbain et de la végétalisation sur le climat local/régional* ». Projet émergent Labex BASC. 3 partenaires.

PAUL : « *Pilot Application in Urban Landscapes towards integrated city observatories for greenhouse gases* ». H2020 EU Greendeal project.

Préambule :

Cela faisait quelques temps que l' « on » me poussait à présenter une Habilitation à Diriger des Recherches. Les événements de la vie, les responsabilités que j'ai décidé de prioriser ont conduit à une certaine lenteur dans ce processus. C'est désormais chose faite, avec une envie de faire reconnaître officiellement le travail accompli depuis près de vingt ans.

Dans ce rapport, j'ai choisi de faire l'impasse sur les années de recherche antérieures à 2009 orientées sur la modélisation du continuum sol-plante-atmosphère, qui étaient la continuité de mon travail de thèse en 1998 et qui entraient dans le domaine d'application de la consommation en eau des agroécosystèmes. Toutefois, cette thématique de recherche m'a ancrée dans le souhait de travailler avec des approches mécanistes sur les échanges sol-plante-atmosphère, de faire apparaître très tôt la question de l'intégration des processus en allant de l'absorption des racines à la transpiration et de me pencher aussi sur les systèmes hétérogènes. Je reste par ailleurs un des référents de mon équipe pour l'enseignement et la recherche dans ce domaine.

J'ai rédigé ce rapport avec le souci de rester aussi simple et pédagogique que possible, de décrire prioritairement les bases et permettre (je l'espère) une appropriation des concepts manipulés par des non-experts des « schémas résistifs ». Cela va dans le sens de mes actions de recherche qui incluent assez systématiquement une phase de transmission vers les autres (étudiants, chercheurs, potentiels utilisateurs, société civile ou compagnie privées et même jeunes écoliers à l'occasion) et une mise à disposition des productions. Par ailleurs, j'ai essayé de mentionner les papiers de référence pour les concepts physiques ou biologiques clés du travail, complétés de références plus récentes lorsque cela m'est apparu nécessaire.

En complément des remerciements précédents, je tiens à souligner que j'ai bénéficié d'un soutien indéfectible de mes collègues de l'équipe Eco&Phy. Notre communauté de travail dans l'UMR ECOSYS et tout particulièrement dans l'équipe Eco&Phy, anciennement équipe « Atmosphère » ou « Bioclimatologie » est engagée dans une démarche de travail d'équipe qui forme un environnement particulièrement appréciable et tout à fait propice à la créativité scientifique.

Le choix des membres du jury de cette HDR a été guidé par le souci de valider la conduite de mes recherches *i/* sur les éléments les plus techniques des modélisations relatifs aux échanges avec l'approche résistive et *ii/* sur ceux les plus en lien avec la pollution atmosphérique et la modélisation de ses interactions avec les surfaces biogéniques, mais aussi *iii/* avec l'objectif d'avoir un regard d'autres disciplines connexes et sur de plus larges échelles temporelles et spatiales où qualité de l'air, dérèglements climatiques et développements durables se côtoient.

A propos des perspectives, le transect ville-campagne que je détaillerai est un élément que j'avais avancé, argumenté et discuté dès le début de ma carrière. Sur ce thème, j'ai saisi une opportunité en 2013 en m'investissant dans la co-conduite d'un projet phare du Labex BASC avec C. Aubry et j'ai bénéficié du recrutement d'un maître de conférences (P. Stella) sur les milieux urbains au sein de mon UFR. J'ajouterai en parallèle que je suis aussi heureux d'avoir semé les « graines d'idées » au sein de l'INRAe sur l'intérêt d'étudier l'émission des Composés Organiques Volatils (COV) par les agrosystèmes qui est désormais une thématique de recherche traitée dans notre équipe à ECOSYS.

Pour terminer, mais ce n'est qu'une seconde graine d'idée plus récente, seulement animé par un intérêt personnel et un feeling sur les enjeux sociétaux et scientifiques de demain, j'aimerais tisser des liens avec le littoral car cet espace entremêle des milieux agricoles, des écosystèmes naturels, une urbanisation croissante (en France et à l'international) et un contexte climatique, microclimatique et de qualité de l'air spécifique. Une telle évolution de mes recherches n'est pas envisagée, pas même esquissée dans le rapport mais j'ai le sentiment que ces espaces où de nombreux enjeux se croisent (à l'échelle régionale ou globale) méritent un investissement d'AgroParisTech plus conséquent pour mieux comprendre et anticiper l'évolution de notre monde et surtout, ce serait un terrain de jeu scientifique passionnant à mes yeux.

Table des matières

Introduction générale.....	2
Partie 1 Activités de Recherche et Développement.....	8
<i>Description du modèle SurfAtm.....</i>	<i>12</i>
Couplage du bilan d'énergie et de l'échange biosphère-atmosphère pour tous les polluants	14
Adaptation au cas de la modélisation des échanges d'ammoniac	17
Adaptation au cas de la modélisation du dépôt d'ozone	22
Adaptation au cas de la modélisation de la volatilisation des pesticides	26
<i>Analyser les résultats de simulations des échanges biosphère-atmosphère avec le modèle SurfAtm</i>	<i>32</i>
Diagnostic sur les sources et les puits.....	32
Etablir des bilans des dépôts ou d'émission – quantifier les échanges sur la durée	37
<i>Et si l'on faisait des mesures pour estimer des flux ?.....</i>	<i>40</i>
Développements météorologiques pour la mesure des flux d'ammoniac atmosphérique – ROSAA..	41
Mise au point de dispositifs simplifiés pour une estimation améliorée des flux.....	45
Partie 2 Transferts de connaissances (pour et par la recherche)	50
<i>transferts au travers l'enseignement.....</i>	<i>51</i>
<i>Au service des utilisateurs.....</i>	<i>55</i>
Partie 3 Perspectives et Projet.....	58
<i>Axe 1 : Recherches dans la continuité des travaux actuels à l'échelle de la parcelle</i>	<i>62</i>
déploiement de l'approche résistive pour des éco ou agrosystèmes complexes (Vignes, Rizières)	62
Adaptation à l'étude des émissions de composés organiques volatils.....	65
<i>Axe 2 : Vers l'étude des espaces urbains et périurbains et vers des travaux de spatialisation pour évaluer les liens entre usages des surfaces et impacts sur le climat régional en termes de qualité de l'air</i>	<i>67</i>
Etudes et modélisation des canyons urbains	68
Intégration des connaissances dans des modèles spatialisés	71
Liste Publications – E. Personne.....	78
Bibliographie citée dans le rapport	86

Introduction générale

Le problème des pollutions atmosphériques est devenu une question sociétale majeure depuis une trentaine d'années (première édition des directives OMS Europe sur la qualité de l'air en 1987 avec de régulières mises à jour car les liens avec la santé publique sont désormais clairement établis, touchant presque autant les pays occidentaux que les pays du Sud, à l'échelle de la région ou bien à l'échelle mondiale (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2000, 2021)). L'impact de l'exposition humaine à la pollution atmosphérique par les particules fines en lien avec l'activité humaine a été estimé à près de 50.000 décès prématurés par an pour l'ensemble de la France (Pascal et al., 2016), accentué dans les zones urbaines avec une perte de 15 mois d'espérance de vie à 30 ans du fait de cette exposition. Le coût global (sanitaire et non sanitaire) pour la France est estimé à plusieurs dizaines de milliards d'Euros (allant de 20 à 30 milliards d'Euros en France selon les hypothèses ; Commission d'enquête du Sénat, 2015 ("Pollution de l'air : le coût de l'inaction,") – et rapport CGDD 2013). Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé la pollution de l'air ambiant extérieur dans son ensemble et les particules en suspension composant cette pollution atmosphérique comme cancérigènes pour l'Homme (groupe 1) (CIRC, 2016). A l'échelle de la planète, l'estimation la plus récente de morts prématurés dus aux pollutions atmosphériques est de l'ordre de 10 millions de décès annuels (Vohra et al., 2021)).

Si ce problème est important sur le plan sanitaire, il l'est aussi sur le plan écologique. En effet, les pollutions atmosphériques touchent aussi les agro et écosystèmes, avec des impacts nombreux tels que la perte de biodiversité (Barker and Tingey, 2012) ou la réduction des rendements (Manisalidis et al., 2020, Tai and Val Martin, 2017, Ainsworth et al., 2012). Les agences nationales et internationales publient donc régulièrement des rapports scientifiques de synthèse ou des directives qui pointent les liens avec la santé et désormais avec l'environnement aussi (e.g. rapport agence européenne de l'environnement 2020 (European Environment Agency., 2020), rapport d'expertise ANSES - (*rapport expertise 2017*, n.d.)).

Sur le plan scientifique, cette question est devenue cruciale car la compréhension des mécanismes à l'origine des pollutions de l'air est encore à ce jour très incomplète, ce qui empêche une évaluation précise de ses effets ou de ses causes, évaluation pourtant nécessaire à la mise en place de politiques publiques efficaces.

Dans ce contexte, l'un des efforts scientifiques à développer porte sur l'étude des mécanismes au niveau de l'interface entre l'atmosphère et la biosphère continentale, plus précisément des surfaces telles que les espaces agricoles et les écosystèmes naturels, qui représentent une source ou un puits de composés, voire les deux à la fois, selon les situations. Contrairement aux sources ponctuelles telles les industries ou le transport, dont l'émission est très élevée mais très localisée, ces surfaces représentent une interface d'échange localement de faible intensité, mais qui couvre une étendue très importante, ce qui lui confère un rôle majeur en termes de dépôt et/ou d'émission de polluants. Enfin, depuis plusieurs décennies la composition de l'atmosphère change, ce qui engendre un besoin de mieux comprendre ses interactions avec la biosphère (Fowler et al., 2009a; Isaksen et al., 2009).

C'est dans ce contexte que j'ai réorienté mes recherches depuis 2003. Avant cette date en effet, mes travaux, étaient focalisés sur le transfert d'eau dans le continuum sol-plante-

atmosphère et le bilan d'énergie dans les milieux hétérogènes (Personne, 1998, Personne et al., 2003). Ces travaux m'ont aidé à construire une approche simple et mécaniste du bilan d'énergie des surfaces, que j'ai adaptée et intégré pour faire évoluer mes recherches vers une thématique devenue prépondérante dans mon UMR : l'émission et le dépôt de polluants à l'interface des surfaces continentales et de l'atmosphère.

Concrètement, j'ai essayé de contribuer à la production de connaissances et surtout d'outils (modèles et mesures) pour évaluer quantitativement les émissions et dépôts des composés gazeux sur et depuis les agro et écosystèmes en tenant compte de leurs interactions énergétique et hydriques avec l'atmosphère. En effet, être en mesure de quantifier, par la mesure ou la modélisation, les échanges de gaz et d'énergie entre la biosphère et l'atmosphère, c'est se donner les moyens de répondre aux questions environnementales voire sociétales en lien avec la pollution atmosphérique dont je viens de souligner l'importance.

Trois constats justifient le travail de recherche qui est décrit dans ce rapport :

i/ l'évaluation des impacts des pollutions atmosphériques sur la biosphère est « difficile » à bien quantifier, notamment parce que les outils actuels (modèles et mesures) estiment de manière souvent imprécise les quantités absorbées ou déposées de polluants gazeux sur la biosphère ;

ii/ il y a un manque de connaissances quantitatives sur le rôle que peut jouer la biosphère en faveur ou en défaveur des pollutions atmosphériques (émission ou dépôt) ;

iii/ les évaluations actuelles sur les impacts (santé, environnement, biodiversité, ...) mettent de plus en plus en avant l'importance des cocktails de polluants et la nécessité d'avoir une approche systémique, dépassant le focus particulier sur tel ou tel composé.

La quantification des émissions et/ou des dépôts de gaz de la biosphère est complexe pour trois raisons majeures : en premier lieu, l'interaction se fait sur le végétal **et** sur le sol ; les natures physiques et chimiques - ainsi que le fonctionnement biologique de ces deux entités étant différentes, cela entraîne un premier niveau de complexité ; un deuxième niveau de complexité naît des interactions température-dépendantes entre les surfaces et les composés gazeux qui nécessite de connaître précisément et distinctement les températures des surfaces du sol et de la végétation. Enfin, le troisième niveau de complexité tient à l'hétérogénéité des surfaces de la biosphère, composées d'une mosaïque d'éco et d'agrosystèmes composant un paysage varié, qui de plus peut évoluer dans le temps et au sein duquel les interventions humaines (pratiques agricoles, interventions forestières, artificialisation des surfaces, etc...) doivent prises être en considération.

Donc, pour relever le défi de mieux évaluer quantitativement i/ les impacts de la pollution sur la biosphère et ii/ l'effet de la biosphère sur la pollution atmosphérique, il faut mieux mesurer les flux de polluants et développer une modélisation mécaniste qui estime ces flux biosphère-atmosphère à l'échelle locale et qui, si possible, est générique (i.e. transposable facilement à plusieurs gaz), pour ensuite aller vers les impacts et élargir les échelles.

Sur la base de ce qui précède, quatre piliers structurent mes activités de recherche. Les trois premiers concernent la modélisation, le quatrième la métrologie. Je considère en effet, qu'en matière de maîtrise de la pollution atmosphérique, il est aussi important de disposer de modèles utilisables que de savoir mesurer sur le terrain les flux de polluants.

Constats

Pourquoi la quantification des flux est « complexe » ?

Ligne de Recherche

Piliers des développements proposés

- **Pilier 1** : distinguer les processus intervenant au niveau du sol de ceux qui agissent au niveau de la végétation ;
- **Pilier 2** : intégrer le couplage des échanges entre énergie, eau et polluants gazeux, car les processus d'échange pour les gaz sont température-dépendants au niveau des surfaces ;
- **Pilier 3** : répondre aux besoins de recherches appliquées sur les impacts. Les développements ont donc été pensés pour être simples mais fiables et utilisables par d'autres communautés scientifiques (des écologues, agronomes ou écophysiolgistes pour les impacts sur la biosphère, des spécialistes de la pollution de l'atmosphère pour les impacts des pratiques agricoles ou de l'occupation de l'espace sur la qualité de l'air) ;
- **Pilier 4** : le quatrième pilier est métrologique, il vise à mieux mesurer les échanges de polluants atmosphériques. Il m'a conduit à m'impliquer dans le déploiement de mesures *in situ* ou dans la mise au point d'instruments i/ plus précis (et ainsi répondre aux besoins de la recherche, notamment pour mieux évaluer les processus mal compris) et ii/ plus simples (facilement mobilisables pour répondre à des besoins pour la surveillance de la qualité de l'air), en combinant au mieux simplicité d'utilisation et précision.

Dans les évolutions de mes activités de recherche, j'élargis désormais mon activité en termes d'échelle et d'objets. En effet, le fil conducteur de départ répondait aux difficultés scientifiques rencontrées à l'échelle locale tandis que le niveau de complexité relatif à l'hétérogénéité des paysages et à la mosaïque des éco et agrosystèmes est une orientation plus récente et qui est précisée à la fin du document dans la partie « perspectives et projet ».

Trois gaz ont été étudiés au cours des 15 dernières années de mon travail. Tout d'abord l'ammoniac (NH₃), puis l'ozone (O₃) et enfin les pesticides (sous leur forme gazeuse).

« Pourquoi ces trois gaz ? » : ces trois gaz permettent de s'engager dans la voie des impacts *a/* sur les écosystèmes naturels (plutôt l'NH₃), *b/* sur la santé (O₃ et pesticides) et *c/* dans le domaine de la qualité de l'air (O₃ et NH₃ par ses liens avec la formation des particules).

Chacun de ces gaz a des comportements d'émission ou dépôt et d'impacts différents mais le défi est justement de savoir prendre en compte les spécificités de chacun d'eux avec une approche générique. Cet objectif de recherche de généralité m'apparaissait comme un atout pour pouvoir étudier plusieurs polluants « en même temps » car les solutions aux questions d'aujourd'hui dans la problématique des pollutions atmosphériques nécessitent une vision systémique et donc des outils pour passer d'un composant à un autre sans avoir à renouveler tous les concepts des échanges entre biosphère et atmosphère. En effet, les pollutions atmosphériques doivent se voir comme un tout, notamment en termes d'impacts environnementaux et de santé publique car les interactions entre polluants et les cocktails de composés exacerbent souvent les impacts d'un seul polluant considéré isolément.

Le socle pour bâtir mes réponses aux questions posées a été de toujours coupler des lois physiques solides et fiables pour traiter (*i.e.* modéliser ou mesurer) des échanges de masse (gaz) et d'énergie entre la biosphère et l'atmosphère, avec le souci de rester aussi simple que possible pour faciliter les interprétations de résultats et le transfert de connaissances ou d'outils vers la société (étudiants, entreprises, organisations nationales). En effet, beaucoup de mes activités ont eu comme débouché des enseignements ou des transferts d'outils (modèles et mesures/instruments) à des utilisateurs moins spécialistes des échanges sol-végétation-atmosphère.

Pour terminer cette partie, j'ajoute que ce qui fait selon moi l'originalité de l'ensemble de mon travail réside dans le couplage des mécanismes d'échanges d'énergie-eau-polluants gazeux entre les couverts (éco ou agro-systèmes) et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle et cette recherche de généricité de l'approche de modélisation et de mesure.

Le rapport est construit en trois parties, la première résume mes activités de recherche dans le domaine des échanges biosphère-atmosphère pour les gaz polluants, la seconde partie précise les transferts réalisés pour et par la recherche et enfin la dernière partie précise mes perspectives de recherche en incluant ce qui est en cours et à venir.

- En ce qui concerne la première partie, les éléments génériques sont d'abord exposés pour présenter les fondamentaux utilisés tout au long du rapport, puis les éléments d'adaptation à chaque gaz étudié ; j'explique ensuite en quoi cette approche a permis des avancées scientifiques et enfin je présente l'investissement métrologique que j'ai réalisé pour la mise au point de deux systèmes de mesure afin d'illustrer cet aspect de mes activités de recherche.
- La seconde partie, qui précise les transferts de connaissances qui me sont chers et que je conçois comme une finalité importante de mon travail, est décomposée en un volet en lien avec l'enseignement et un volet en lien avec la mise à disposition d'outils.
- Concernant la dernière partie relative aux perspectives et au projet, je précise d'abord les avancées à poursuivre dans le domaine des échanges biosphère-atmosphère à l'échelle de la parcelle et dans un deuxième temps, je présente les éléments d'évolution de mes priorités vers de plus grandes échelles, notamment en intégrant les interactions entre les espaces urbains et périurbains.

Ligne directrice
initiale :

Approche
couplée
eau-énergie-gaz
pour les
échanges
biosphère-
atmosphère

Partie 1 –
Activités de
Recherche et
Développement

Partie 2 –
Transfert de
connaissances

Partie 3 –
Projet et
Perspectives

Partie 1
Activités de Recherche et Développement



Description du
concept clé
pour
l'ensemble du
travail

L'approche résistive s'inspire de la loi de Fick au milieu du 19^{ème} siècle (Fick, 1855) qui établit que la relation entre le flux F_χ est proportionnelle au gradient de la grandeur étudiée (χ), ce qui donne l'équation suivante pour des transferts verticaux :

$$F_\chi = -K_\chi \frac{\partial \chi}{\partial z}; \quad [1]$$

Transposé au cas des échanges atmosphériques, le coefficient d'échange K_χ exprime la facilité de l'échange dans le milieu turbulent « atmosphère ». Il dépend des conditions de convection différentes à chaque hauteur z , donc de la vitesse du vent et de sa décroissance en s'approchant du sol (du/dz) et des échanges thermiques (les conditions de stabilité, neutralité ou instabilité thermique qui sont déterminées par dT/dz), $K_\chi = f(z, du/dz, dT/dz)$.

Pour des échanges verticaux entre la surface de la biosphère (sol + plante) et l'atmosphère, le flux est donc proportionnel au gradient vertical de concentration de la grandeur χ étudiée. L'intégration spatiale de cette équation entre deux niveaux finis $z1$ et $z2$, avec un transfert turbulent dépendant de la hauteur, peut être simplifiée en introduisant le différentiel de concentration entre deux niveaux ($\chi_2 - \chi_1$) divisé par la résistance au transfert $r_{a(z1,z2)}$ entre ces deux niveaux $z1$ et $z2$.

Avec $r_{a(z1,z2)} = \int_{z1}^{z2} \frac{1}{K_\chi} dz$, l'équation [1] devient par intégration spatiale entre $z1$ et $z2$:

$$F_\chi = - \frac{\chi_2 - \chi_1}{r_{a(z1,z2)}} \quad [2]$$

On introduit donc ici la notion de résistance au transfert. Associée à l'étude des flux, cela conduit à modéliser le phénomène en utilisant une analogie électrique, le flux étant l'analogie du courant plus ou moins freiné par la résistance offerte par le milieu entre deux interfaces.

Le transfert de gaz ou de chaleur peut alors être représenté par un schéma résistif, il est proportionnel au différentiel entre deux points et la résistance entre ces deux points. Ce concept de proportionnalité entre le flux et le gradient de la grandeur étudiée est aussi utilisé pour les transferts i/ à travers des stomates, ii/ depuis la surface du sol ou iii/ au sein du couvert. En somme, il permet de combiner une série de résistances dans l'air, le sol et la plante pour tenir compte de la multiplicité des sources et puits de composés à l'aide de schémas résistifs de type électrique par analogie avec la loi d'Ohm. L'origine des premiers modèles résistifs complets mettant en série les résistances entre chaque élément de la biosphère (sol, plante, feuille, stomate, atmosphère) date de la fin des années 70 (Deardorff en 1978). C'est d'abord inspiré de la description du continuum sol-plante-atmosphère décrit dans sa globalité par Cowan en 1965 sur la base de la transposition de la loi d'Ohm pour le transfert dans la plante (Van den Honert, 1948). Classiquement sur le

terrain, cette approche flux-gradient, parfois appelé Aerodynamical Gradient Method (AGM) dans le domaine de la mesure, est appliquée pour la mesure des échanges entre la biosphère et l'atmosphère avec des capteurs positionnés sur un mât permettant plusieurs mesures de vitesse du vent, température et polluants selon la hauteur comme l'illustre la **figure 1**. Les mesures réalisées à plusieurs hauteurs permettent d'établir un différentiel moyen pour une différence de hauteur donnée. Dans ce cas précis, il est pertinent de tenir compte de la décroissance logarithmique des variables en fonction de la hauteur par une transformation log des variables comme proposé par Sutton et al., (1993).



figure 1 : illustration d'un dispositif de mesures pour estimer des flux de gaz entre un couvert végétal et l'atmosphère.

Dans l'exemple, six niveaux de mesures sont réalisés pour établir le différentiel moyen de concentration et évaluer les caractéristiques de turbulence de l'atmosphère (pour toutes les hauteurs z , mesures de la vitesse du vent u et de la température T). Le rapprochement des mesures à proximité de la surface tient compte de la décroissance log-linéaire des variables selon z . L'intégration temporelle des mesures est faite sur 15 à 60 min. En complément, la photo présente aussi une mesure des caractéristiques de la turbulence avec un anémomètre sonique.

Dyer and Hicks (1970), Businger (1973), puis des synthèses proposés par Dyer (1974) et Brutsaert (1975) figurent parmi les auteurs des premiers manuscrits scientifiques expliquant la transposition de cette approche flux-gradient et de ses déterminants pour l'étude des échanges biosphère-atmosphère en particulier pour la chaleur et la vapeur d'eau. Les différentes approches pour représenter ces échanges biosphère-atmosphère à l'échelle de la parcelle et pour leur utilisation dans des modèles de plus grande échelle (en tant qu'interface de modèle de climat / Global Change Model [GCM] ou modèle de circulation atmosphérique) sont décrits dans Avissar and Verstraete en 1990, tandis que Pitman (2003) explique l'évolution de ces schémas et Bonan et al. (2021) précise l'intérêt des schémas simples par rapport aux modèles multicouches.

Il convient toutefois de garder en tête que ce concept n'est valide pour l'expérimentation et la modélisation que sous les quatre conditions principales suivantes (extraites des documents de synthèse de Prueger and Kustas (2015), de Brutsaert (1998) et des cours de Baldocchi en ligne³). En premier lieu, la divergence du flux vertical doit rester négligeable (le flux est constant avec la hauteur) ce qui suppose que les flux ne sont pas perturbés par des phénomènes advectifs ni par des réactions chimiques entre chacun des points du schéma. D'autre part, les flux doivent être stationnaires ce qui induit que les pas de temps très courts (en dessous de quelques minutes) ou trop grands (supérieurs à

³ <https://nature.berkeley.edu/biommetlab/index.php?scrn=Baldocchi>

l'heure) ne sont pas adaptés. Enfin, les effets de stabilité ou d'instabilité thermique dans l'air peuvent/doivent être corrigés par des fonctions de correction et enfin, la zone de transition entre les flux en conditions turbulentes et les flux diffusifs (au niveau des couches limites de rugosité des surfaces ou au sein des surfaces étudiées) peut être considérée comme négligeable ce qui permet de juxtaposer les transferts en conditions laminaires avec ceux en conditions turbulentes.

Cette approche « flux-gradient » est modélisée de manière couplée entre la chaleur et la vapeur d'eau depuis la fin des années 70 (Deardorff, 1978, Monteith, 1981). Elle a permis l'établissement d'équations fondamentales décrivant l'évapotranspiration, notamment l'équation dite de Penman-Monteith (voir notamment la chapitre écrit par Allen en 2005 pour un descriptif synthétique des approches sur la modélisation de l'évapotranspiration). Monteith (1965) fut en effet le premier à unifier le concept et les facteurs de l'évapotranspiration en intégrant la régulation stomatique du couvert végétal. Les premières paramétrisations pour modéliser la régulation biologique du couvert par les déterminants de l'ouverture et la fermeture stomatique ont été initiées par les travaux de Jarvis (1976) et complétés par ceux de Cowan (1977) bien que des descriptions très précises de cette ouverture stomatique aient été avancées dès les années 50 (notamment Bange, 1953). De nombreux modèles de surface décrivant les échanges d'énergie et de vapeur d'eau entre biosphère et atmosphère ont été conçus sur la décennie 1990 pour inclure les processus d'interaction entre la biosphère et l'atmosphère dans les modèles climatiques et météorologiques. Pour les études sur les scénarios climatiques, la régulation biologique tenant compte des effets de la concentration en CO₂ s'est beaucoup inspiré des travaux de Ball et al., (1987). Ces modèles d'échange Biosphère-Atmosphère (appelés souvent modèle SVAT pour Soil Vegetation Atmosphere Transfer) sont par exemple les modèles ISBA (Noilhan and Mahfouf, 1996) et la version tenant compte de l'effet du CO₂ sur la régulation stomatique avec ISBA-A-gs (Calvet, 1998), SECHIBA (Ducoudré et al., 1993) et sa version tenant compte de la rétroaction CO₂ et dynamique de la végétation (Viovy, 1996) ou SSIB (Xue et al., 1991), PLEIM-XIU (A. Xiu and J. E. Pleim, 2001).

Cette approche résistive a aussi été transposée dans le domaine de la pollution atmosphérique à la fin des années 70 (Wesely and Hicks, 1977), mais sans couplage direct avec les schémas résistifs pour l'énergie et l'eau. A titre d'exemple, le modèle de chimie-transport CHIMERE à l'échelle régionale (Vautard et al., 2001) qui dispose d'un modèle de surface pour les échanges gazeux intègre l'approche de Wesely précédente mais la dimension eau et énergie directement couplée aux échanges de polluants sur les surfaces n'est pas présente dans les premiers développements de CHIMERE. C'est aussi le cas d'autres modèles de surface spécialisés dans les échanges de polluants comme le modèle de Meyers et al., (1998), pourtant l'un des premiers modèles multicouche et multipolluant.

En complément, en particulier pour les échanges de gaz polluants, la distinction entre sol et plante n'est apparue qu'à la fin des années 90 avec le déploiement d'approches multicouches, d'abord simples puis très détaillées (Meyers et al., 1998, Nemitz et al., 2000, Flechard et al., 2013). En effet, la majorité des modèles pour les études de l'émission ou du dépôt de polluants atmosphériques sur la biosphère considèrent la surface comme une seule entité « couvert » (approche dite « Big Leaf ») sans distinction des différences de fonctionnement entre le sol et la plante vis-à-vis des gaz.

Transposition
des schémas
résistifs aux
« gaz
polluants »

DESCRIPTION DU MODELE SURFATM

Points forts et mise en place de la modélisation

Présentation du modèle SurfAtm

Sur la base de ces constats à l'issue de ma thèse en 1998, j'ai donc conçu une modélisation des échanges couplés entre l'énergie, l'eau et les composés gazeux pour une surface biogénique composée d'une végétation et d'un sol. La **figure 2a** illustre les voies d'échange prises en compte, c'est-à-dire les échanges du sol, ceux des stomates et ceux de la cuticule avec l'atmosphère et la **figure 2b** précise le schéma résistif correspondant. Il est donc distingué les échanges turbulents dans l'air, ceux au-dessus de la végétation et ceux dans la végétation, caractérisés par une résistance aérodynamique R_{air} au dessus de la végétation et dans la végétation R_{acouv} . Les échanges en conditions laminaires sont ceux immédiatement au-dessus de la surface du sol et de la végétation, ils sont donnés par les résistances R_{bsol} et R_{bcouv} . Les échanges depuis la cavité sous-stomatique sont dépendants de la régulation stomatique calculée par la résistance stomatique (R_{stom}) tandis que les échanges provenant du compartiment humide du sol sont dépendants de la résistance de surface du sol R_{surf_sol} . Pour ce qui est de l'échange au niveau de la cuticule, le modèle introduit une résistance cuticulaire R_{cut} .

Le schéma résistif complet, intégrant le couplage avec l'eau et l'énergie, est présenté sur la figure suivante (**figure 3**). Cette figure décrit le modèle SurfAtm conçu dans sa version initiale pour les échanges d'ammoniac en 2003 (Personne and Loubet, 2003).

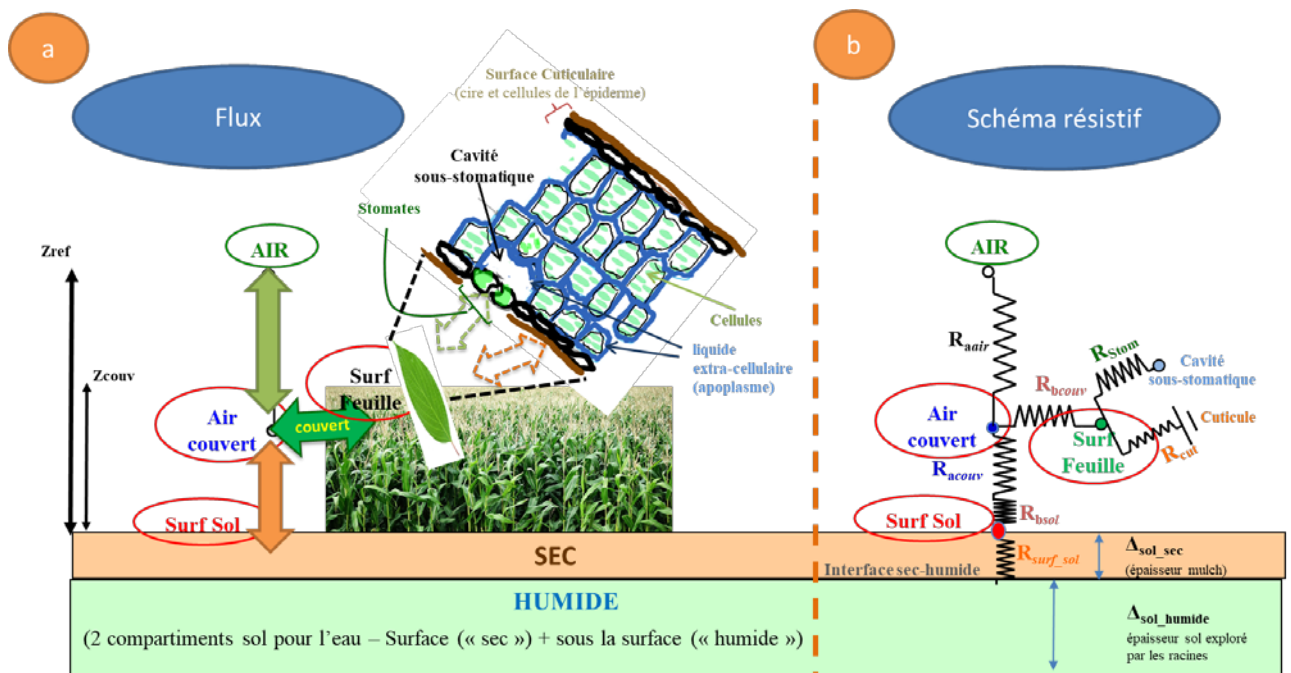


figure 2 : a/illustration des voies d'échange entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Les flèches symbolisent les flux possibles entre chaque compartiment considéré. b/schéma résistif générique adopté pour représenter les échanges entre le sol et la végétation décomposée en une composante stomatique et une composante cuticulaire.

Similarité entre les schémas eau, énergie et polluants

Le schéma pour la chaleur et la vapeur d'eau n'est pas nouveau : il est inspiré des travaux de Choudhury and Monteith (1988). Ce schéma repris et adapté aux polluants a permis de distinguer l'échange avec le sol de celui avec la végétation comme d'autres modèles commençaient à le faire (Meyers et al., 1998, Grunhage and Haenel, 1997).

Toutefois, le développement de « SurfAtm » a répondu aux défis cités précédemment :

- Il y a une distinction des processus au niveau du sol et au niveau de la végétation pour les échanges d'énergie, d'eau et de gaz.
- Pour les composés dont l'émission ou le dépôt dépendent de la température des surfaces, le couplage du schéma résistif eau-énergie-polluants permet une modélisation incluant les effets des températures des surfaces sur les échanges de polluants.
- Grâce à la validation des échanges d'eau et d'énergie par des mesures classiques (mesures de flux d'énergie des surfaces), on peut raisonnablement faire l'hypothèse que les résistances adaptées à l'eau et l'énergie sont transposables et valides pour le schéma d'échanges des composés gazeux sachant que celui-ci s'appuie sur les mêmes concepts régissant les transferts en milieu turbulent et laminaire dans l'air et au niveau des interfaces des feuilles et du sol.

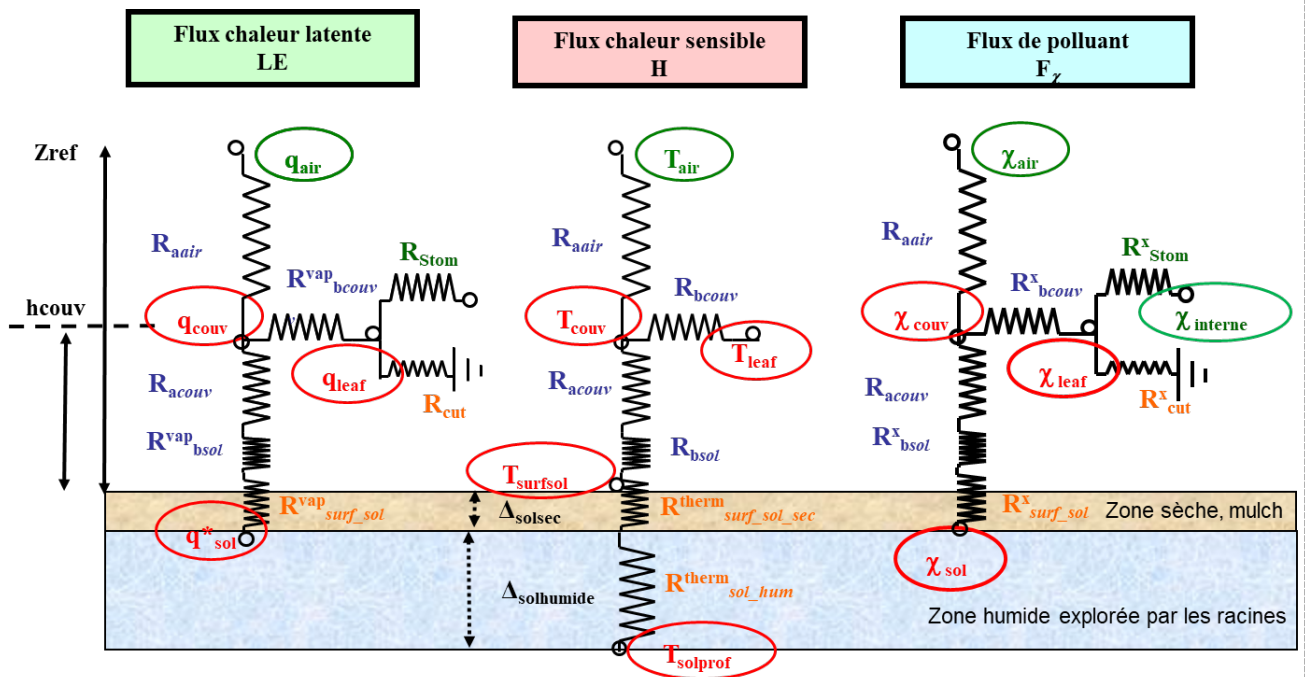


figure 3 : schéma résistif détaillé de SurfAtm, distinguant les échanges entre sol, plante et atmosphère pour la vapeur d'eau, la chaleur et les échanges de composés gazeux (repris de Personne et al., 2003, 2009)

z représente la hauteur, au-dessus du sol, q , T et χ se réfèrent à la pression de vapeur d'eau, la température et le composé gazeux étudié. R_{aair} , R_{acouv} , R_{bcouv} , R_{bsol} , $R_{surf_sol_sec}$, R_{sol_hum} , R_{stom} et R_{cut} sont respectivement la résistance aérodynamique au-dessus du couvert, celle dans le couvert, la résistance de la couche limite au niveau des feuilles, celle au niveau de la surface du sol, la résistance au transfert au travers la couche de sol sec (en surface), celle dans la zone du sol humide, la résistance stomatique moyenne pour le couvert et la résistance cuticulaire du couvert. Les indices vap et χ se réfèrent aux grandeurs scalaires (eau et composé gazeux χ étudié). Δ_{sol_sec} et Δ_{sol_hum} sont les épaisseurs des compartiments de sol sec et sol humide respectivement.

COUPLAGE DU BILAN D'ÉNERGIE ET DE L'ÉCHANGE BIOSPHERE-ATMOSPHERE POUR TOUS LES POLLUANTS

On sait que les processus d'adsorption, de désorption, d'absorption ou de volatilisation sur ou depuis les surfaces sont dépendants de la température des surfaces et, selon les composés étudiés, de la pression de vapeur d'eau ou des films d'eau sur les surfaces (voir par exemple les travaux d'Altimir et al., (2006) pour l'ozone sur les feuilles, les travaux de Flechard et al. (1999) sur les propriétés et échanges physico-chimiques au sein des surfaces de feuilles pour l'ammoniac). Avec cette approche couplée eau/énergie/gaz pour les surfaces de sol et de végétation, l'objectif était de disposer d'un potentiel de diagnostic supérieur aux approches qui se limitent à la paramétrisation des échanges gazeux en tenant compte de la température et de l'humidité à un niveau de référence dans l'air (comme les premiers modèles d'échange d'ammoniac le faisaient (Sutton et al. 1993). C'est ici un atout du couplage pour les composés dont les propriétés sont sensibles à la température et à l'hygrométrie des surfaces de sol et de végétation.

Ce couplage entre l'énergie, la vapeur et les composés gazeux est fondé i/ sur l'utilisation des températures des surfaces du couvert calculées (en distinguant le compartiment sol de celui de la plante) pour la modélisation des flux de polluants lorsque ceux-ci sont température-dépendants, ii/ sur un schéma résistif identique entre vapeur d'eau et polluants et une similarité des résistances entre chaque nœud du schéma pour toutes les variables scalaires (vapeur d'eau, gaz, chaleur) (**figure 3**). Les résistances au transfert au sein du schéma sont supposées transposables aux échanges de vapeur d'eau, de chaleur et de composés gazeux χ à condition d'intégrer les modifications relatives aux différences de diffusivité moléculaire entre l'eau et le composé χ étudié pour les transferts en conditions laminaires ou pour ce qui relève de la quantité de mouvement dans ces mêmes conditions comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

En complément au schéma originel de Choudhury et Montheith (1988), le modèle SurfAtm a intégré les échanges au niveau des cuticules car c'est une surface d'échange majeure pour les composés gazeux (dépôt, adsorption, désorption, volatilisation, ...).

Sur cette base, comme pour la chaleur et la vapeur, le flux de polluant pour un gaz χ est composé d'un flux issu de la végétation (F_{veg}^{χ}) et d'un flux issu du sol (F_{soil}^{χ}). Il dépend du différentiel de concentration et de la résistance entre le niveau de référence et l'air du couvert (sur le principe décrit dans l'équation [2]).

Le flux de la végétation dépendra de la résistance stomatique à l'échelle du couvert (R_{stom}^{χ}), de la résistance de couche limite du couvert R_{bcouv}^{χ} , de l'échange cuticulaire et de la concentration du polluant dans la cavité sous-stomatique.

Le flux provenant du sol dépendra de la résistance de surface du sol ($R_{surf_sol}^{\chi}$), de la résistance au transfert au sein du couvert (R_{acouv}) et de la résistance de couche limite de sol (R_{bsol}^{χ}).

Le système d'équations composées d'une série de résistances et de concentrations connues au niveau du sol et des feuilles est résolu analytiquement en déterminant la concentration du composé χ_{couv} à proximité du sommet du couvert, plus exactement à la hauteur de déplacement D à laquelle s'ajoute la rugosité du couvert (notée souvent « $D+z_{0couvert}$ »).

Adaptation des résistances de couche limite et de surface pour la vapeur/chaaleur /les composés gazeux

L'équation clé du modèle pour les flux de polluant χ est décrite ci-dessous (équation [6]) avec les simplifications suivantes : les termes exprimés sous forme de conductance g sont l'inverse des résistances ($g^{\chi} = 1/R^{\chi}$) et la résistance d'interface du sol notée R_{sol}^{χ} est composée de la résistance de surface du sol du fait de l'évaporation (constitution d'une zone sèche type « mulch ») et de la résistance de couche limite du sol ($R_{Sol}^{\chi} = R_{surf_sol}^{\chi} + R_{bsol}^{\chi}$).

La transposition des résistances (ou conductances) pour la chaleur et la vapeur aux composés gazeux χ est sans modification des résistances pour les processus turbulents (il s'agit de la résistance aérodynamique dans et au-dessus du couvert : R_{air} et R_{acouv}), tandis que les résistances de couche limite (indice b) qui dépendent d'échanges en conditions laminares ou quasi-laminaires nécessitent la prise en compte des diffusivités moléculaires de la vapeur d'eau (D_{vap}) et du composé χ étudié (D_{χ}) (Brutsaert, 1975; Hicks et al., 1987). L'adaptation se fait selon les équations [3] et [4] ci-contre.

Pour les résistances stomatiques et à l'interface sol-air, il est aussi tenu compte des diffusivités moléculaires des composés étudiés selon l'adaptation donnée par l'équation [5].

Avec l'objectif de proposer une modélisation opérationnelle, le modèle SurfAtm (Personne et al 2009) calcule toutes les résistances puis résout l'équation [6] compte tenu des conditions météorologiques mesurées et des paramètres listés dans le tableau suivant (tableau des entrées et paramètres du modèle – **Tableau 1**).

$$\chi_{couv} = \frac{\chi_{sol} \cdot g_{sol}^{\chi} + \chi_{air} \cdot g_{air}^{\chi} + \chi_{interne} \cdot \left(g_{bcouv}^{\chi} g_{stom}^{\chi} / (g_{cut}^{\chi} + g_{bcouv}^{\chi} + g_{stom}^{\chi}) \right)}{[(g_{cut}^{\chi} + g_{bcouv}^{\chi} + g_{stom}^{\chi}) \cdot (g_{cut}^{\chi} + g_{bcouv}^{\chi} + g_{sol}^{\chi}) + g_{bcouv}^{\chi} \cdot g_{bcouv}^{\chi}]}$$

[6]

Le modèle calcule distinctement les flux de chaque compartiment selon les équations [7], [8] et [9] ci-contre.

$$F_{tot}^{\chi} = F_{veg}^{\chi} + F_{sol}^{\chi}$$

[7]

$$F_{veg}^{\chi} = - \frac{\chi_{couv} - \chi_{leaf}}{R_{bcouv}^{\chi}} = - \frac{\chi_{leaf} - \chi_{interne}}{R_{stom}^{\chi}} + \frac{\chi_{leaf}}{R_{cut}^{\chi}}$$

[8]

$$F_{sol}^{\chi} = - \frac{\chi_{couv} - \chi_{sol}}{R_{surf_sol}^{\chi} + R_{bsol}^{\chi} + R_{acouv}^{\chi}}$$

[9]

Tableau 1 : Synthèse des principales entrées, sorties et paramètres du modèle SurfAtm.

Les unités des grandeurs ne sont pas précisées pour simplifier la lecture.

ENTREES		
Atmosphère	Sol	Végétation
<p>Forçage météorologique (mesures à la hauteur de référence) – <u>Pas de temps 15 min à 1h</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Rayonnement net (R_n) ou rayonnement global (R_g) (deux options envisageables) • Vitesse du vent ($u(z)$) • Température de l'air (T_{air}) • Humidité relative de l'air (HR) • Précipitations (P) • Concentration χ 	<p>Caractéristiques du sol (sol sec et sol humide)</p> <p><u>Paramètres et initialisation pour le sol</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Etat initial de l'humidité du sol • Densité apparente du sol (d_{sol}) • Porosité do sol • Conductivité thermique du sol sec et humide • Humidité du sol à la capacité au champ (FCC) • Humidité du sol au point de flétrissement permanent (WP) • Seuil d'humidité du sol en dessous duquel la plante subit un stress hydrique (conduisant une régulation stomatique) 	<p>Structure et régulation biologique</p> <p><u>Pas de temps journalier</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Surface foliaire par unité de surface au sol (LAI) • Hauteur du couvert (hc) • concernant les paramètres biologiques pour la régulations stomatique, la résistance stomatique est calculée selon (Emberson et al., 2000) and (Tuovinen et al., 2004) (voir "EMEP" parameterisation).
SORTIES		
<p>Energie et eau</p> <p><u>Distinction sol, plante et air du couvert pour chacun des flux</u></p> <p><u>Pas de temps 15min à 1h</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • flux chaleur sensible (H) • flux chaleur latente (LE) • flux chaleur dans le sol (G) • R_n (si R_g en entrée) <p>Bilan d'eau dans le sol</p>	<p>Variables d'équilibre</p> <p><u>Distinction sol, plante et air du couvert pour chacune des variables</u></p> <p><u>Pas de temps 15min à 1h</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Température des surfaces (sol et végétation) • Température de l'air du couvert ($couv$) • Pression de vapeur au-dessus du sol et de la végétation et air du couvert ($couv$) 	<p>Composés χ</p> <p><u>Distinction sol, plante et air du couvert pour chacune des variables</u></p> <p><u>Pas de temps 15min à 1h</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Flux de gaz (avec distinction entre sol et végétation (stomate et cuticulaire) • Concentration des gaz (sol, végétation, air du couvert)

SurfAtm est développé initialement en langage C, mis à disposition des étudiants depuis 2004 avec une interface Java dans des Travaux Dirigés et désormais ouvert à la communauté scientifique sous l'impulsion de Patrick Stella avec deux développements en C et Fortran 90.

Enjeux de mieux évaluer les échanges d'ammoniac

Sur le plan de la santé pour l'Homme, l'ammoniac gazeux, dans les concentrations rencontrées dans l'atmosphère en Europe, en ville ou dans les espaces ouverts, est peu préoccupant (Ryer-Powder, 1991) car il faut atteindre des concentrations atmosphériques de plusieurs dizaines de microgrammes d'ammoniac par m³ d'air pour que des effets sur la santé soient significatifs. On peut cependant détecter des symptômes pour l'Homme en périphérie proche des zones de production intense d'ammoniac (sous le vent d'une porcherie, à quelques dizaines de mètres selon Schiffman et al., (2005) ou pour les agriculteurs éleveurs selon Iversen et Pedersen (1990). Toutefois, il est un des précurseurs de particules atmosphériques, lesquelles ont des répercussions importantes sur la santé humaine même en faibles quantités au point qu'elles affectent l'espérance de vie (Kampa and Castanas, 2008 ; rapport OMS 2006 et 2013, Pope et al., 2009). Au titre de précurseur de pollutions particulaires, les pics de concentration d'ammoniac atmosphériques sont surveillés depuis une dizaine d'année par les AASQA⁴, l'ammoniac étant en effet considéré comme un problème émergent nécessitant plus de recherche et de surveillance (Galloway et al., 2008, Robichaud, 2020). D'autre part, sur le plan de l'environnement, l'ammoniac gazeux est connu comme un responsable direct de l'acidification des écosystèmes naturels et d'eutrophisation des milieux aquatiques (Krupa, 2003, Erisman and Sutton, 2008, Guthrie et al., 2018). Enfin, selon Sutton et al. (2011), la réduction des pertes ou émissions d'azote dans l'environnement, notamment en incluant la composante atmosphérique, est un défi environnemental majeur pour le XXI^e siècle.

Malgré une assez bonne identification des sources, des effets et interactions avec l'environnement et la cascade de l'azote qui décrit le devenir des formes de l'azote (Galloway et al., 2003, Fowler et al 2013) dans l'environnement, les quantifications exactes et les bilans des échanges (émission ou dépôts) sont encore mal connus (Pan et al., 2020) car ce gaz est particulièrement difficile à mesurer (compte tenu des faibles concentrations dans l'air, de ses propriétés spectrales difficilement discriminantes et de ses propriétés chimiques le rendant instable, se complexant ou s'adsorbant très rapidement).

Encore aujourd'hui, les bilans restent majoritairement établis à l'aide de facteurs d'émission pour chaque type de surface (Velthof et al., 2012, Bittman et al., 2015, Morán et al., 2016, Hamaoui-Laguel et al., 2014). Ces facteurs d'émission ne sont pas bien adaptés à la variabilité des conditions pédoclimatiques et aux pratiques agricoles, même sur des petits territoires. Dans les inventaires européens, l'agriculture est considérée comme le principal secteur d'émissions d'ammoniac, représentant près de 94 % des émissions totales ("Ammonia (NH₃) emissions — European Environment Agency," n.d. ou rapport CITEPA, SECTEN 2018), sa concentration atmosphérique étant issue d'une émission diffuse des surfaces biogéniques et son dépôt faible, il a été indispensable d'améliorer les évaluations des échanges biosphère atmosphère dans les espaces agricoles et les écosystèmes naturels, notamment par le biais d'approches plus mécanistes (Bobbink et al., 2010, Sutton et al 2013) et en prenant en compte l'ensemble des formes de l'azote depuis ses sources et ses puits (Galloway et al., 2008). En conséquence, depuis les années 90, les études sur les processus chimiques et sur les émissions et dépôts ont évolué progressivement vers des schémas résistifs prenant de plus en plus en compte la complexité des sources au sein

Etat des connaissances

⁴ Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air

d'un couvert (Sutton et al 1998, Flechard 1999, Nemitz et al 2000, ...) sans toutefois prendre en compte explicitement et de manière couplée les échanges énergie-ammoniac entre un couvert et l'atmosphère.

La conception du modèle SurfAtm a eu pour ambition d'améliorer les évaluations des échanges couvert-atmosphère pour l'ammoniac en étant adapté aux situations d'émissions et de dépôts notamment en tenant compte des déterminants majeurs des échanges, c'est-à-dire les conditions météorologiques, le fonctionnement écophysiologique de la plante et sa réponse aux stress thermiques et hydriques et aux caractéristiques du sol dont son état hydrique.

Pour comprendre les processus spécifiques à l'ammoniac intégrés au modèle, les déterminants des échanges au niveau des surfaces sont issus des travaux sur le sol et Générmont and Cellier (1997). Ils sont illustrés et transposés au cas des feuilles sur la **figure 4**. L'ammoniac est un gaz soluble dans l'eau de l'apoplasme des feuilles et soumis aux lois de l'équilibre de Henry pour la répartition entre sa phase aqueuse ($\text{NH}_{3\text{aq}}$) et gazeuse ($\text{NH}_{3\text{g}}$; correspondant à la concentration χ). A cela s'ajoute l'équilibre acido-basique entre la forme ammoniacale aqueuse et la forme ammonium (c^+) qui déplace la forme aqueuse $\text{NH}_{3\text{aq}}$ vers la forme ionique NH_4^+ selon le pH. La forme aqueuse majoritaire étant en effet l'ammonium dans les milieux aqueux proche de la neutralité, le déplacement des équilibres dépend donc de la température mais aussi du pH. En somme, la prise en compte conjointe de l'équilibre acido-basique $\text{NH}_{3\text{aq}}/\text{NH}_4^+$ et de l'équilibre de Henry $\text{NH}_{3\text{aq}}/\text{NH}_{3\text{g}}$ conduit à l'équation [10] qui dépend de la température du milieu (T_i^K) exprimé en Kelvin et du potentiel d'émission Γ_i de l'ammoniac (l'indice i permet de distinguer le milieu sol de celui de la plante). Ce potentiel d'émission est dépendant du rapport entre la concentration en ion ammonium NH_4^+ et H^+ donnée par le pH : $\Gamma_i = [\text{NH}_4^+]/[\text{H}^+]$.

$$\chi_i = K_{H_NH3}^{25^\circ\text{C}} \times K_{D_NH3}^{25^\circ\text{C}} \times \exp\left(\frac{H_{D_NH3}^0 + H_{H_NH3}^0}{R} \cdot \left(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{T_i^K}\right)\right) \times \Gamma_i$$

[10]

Les termes $K_{H_NH3}^{25^\circ\text{C}}$ et $K_{D_NH3}^{25^\circ\text{C}}$ sont les constantes d'équilibre de Henry (indice H) et de dissociation (c'est-à-dire l'équilibre acido-basique $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ avec l'indice D), $H_{D_NH3}^0$ et $H_{H_NH3}^0$ sont les enthalpies libres de dissociation et de Henry, R est la constante des gaz parfaits.

La **figure 4** ci-dessous illustre les équilibres au niveau des feuilles avec en particulier ceux qui régulent les échanges entre la cavité sous-stomatique et l'eau apoplasmique (eau extra-cellulaire). Ces équilibres sont similaires et transposables pour le sol et l'équation [10] ci-dessus reste la base de la représentation de l'équilibre entre les formes azotées de l'eau dans le sol.

La concentration interne ($\chi_{\text{interne_plante}}$ ou χ_{sol}) est donc déterminée par le potentiel d'émission Γ_i (Γ_{plante} ou Γ_{sol}) qui est spécifique de chaque plante du fait de son état azoté et son métabolisme, et de chaque sol. Ce potentiel d'émission (sol et plante) est une donnée d'entrée pour le modèle SurfAtm. Cette donnée peut résulter de mesures directes ou de paramétrisations connaissant le type de plante et de sol (voir notamment les travaux de Massad et al. (2010)).

Prise en compte
des processus
physico-
chimiques connus

Généralisation
des processus de
surface au sol et
à la plante

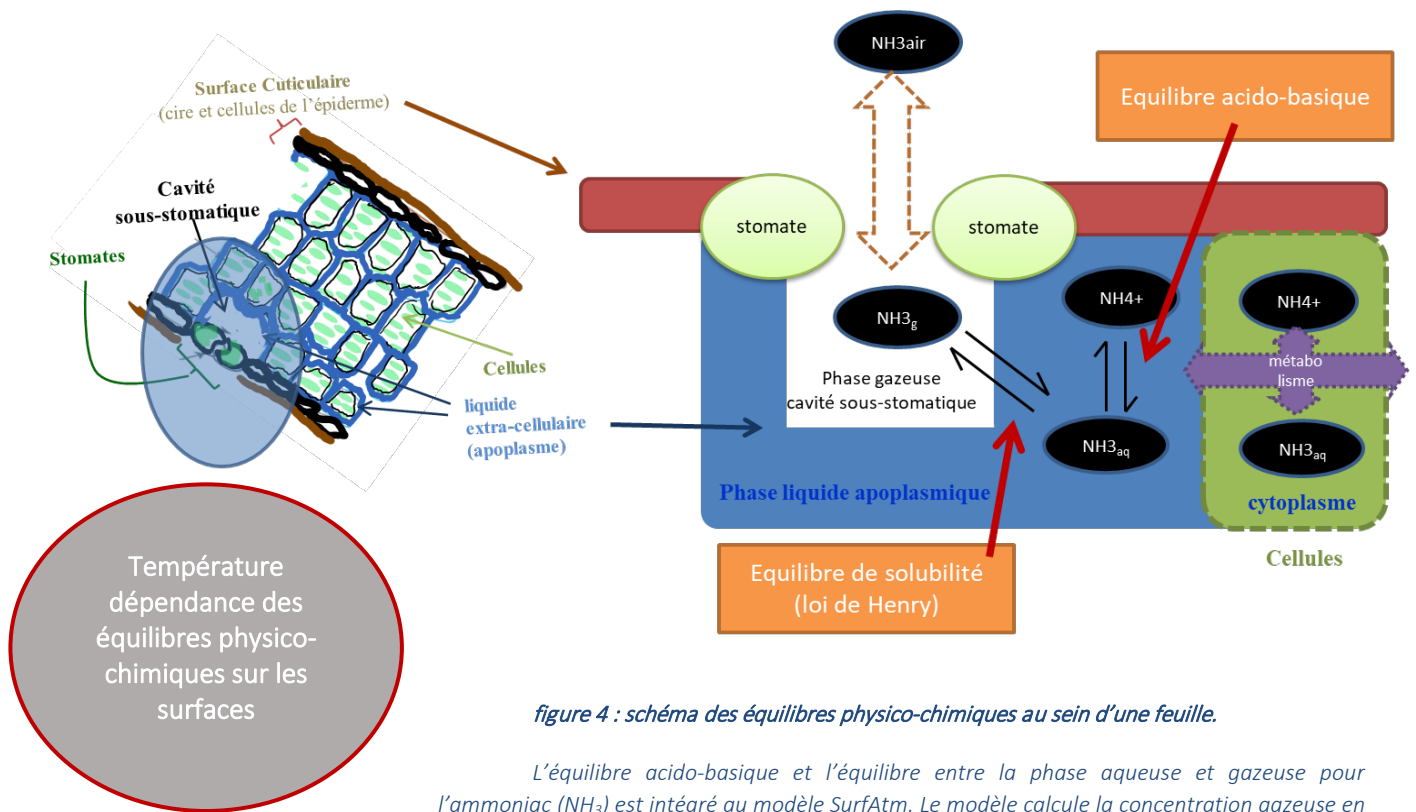


figure 4 : schéma des équilibres physico-chimiques au sein d'une feuille.

L'équilibre acido-basique et l'équilibre entre la phase aqueuse et gazeuse pour l'ammoniac (NH_3) est intégré au modèle SurfAtm. Le modèle calcule la concentration gazeuse en ammoniac (NH_{3g} soit la concentration χ_{NH_3}) dans la cavité sous-stomatique à partir du potentiel d'émission Γ_{plante}

- Concernant le compartiment stomatique, il est avéré que l'azote de la plante est présent sous plusieurs formes et notamment la forme ammonium (NH_4^+). L'ammonium présent dans la phase apoplasmique des feuilles est lié au contenu en azote de la plante (Schjoerring et al., 1998, Mattsson et al., 2009) et il est dépendant du type de plante mais surtout de la richesse du sol en azote (Mattsson et al., 1998). Bien que minoritaire, la forme azotée NH_{3aq} existe dans les feuilles et c'est cette forme qui détermine la concentration en ammoniac dans la cavité sous-stomatique (NH_{3g} équivalent à χ_{NH_3}). Cette forme gazeuse se retrouve dans la cavité sous-stomatique et peut donc être émise ou absorbée selon le différentiel entre l'atmosphère et la cavité sous-stomatique. Il s'agit là d'une approche faisant intervenir le point de compensation de l'ammoniac dans la plante (Farquhar' et al., 1980) ce qui revient à déterminer la concentration de l'ammoniac gazeux (NH_{3g}) qui est en équilibre avec le liquide apoplasmique. La **figure 4** précise la conceptualisation des équilibres (et des échanges) au sein d'une feuille. La résistance stomatique est la résistance qui régule les échanges gazeux entre la cavité sous-stomatique et le milieu extérieur, en premier lieu l'air immédiatement au-dessus de la feuille.

Echanges stomatiques

Echanges avec le sol

- Concernant le sol, les sols cultivés sont le plus souvent fertilisés tandis qu'ils ne le sont pas dans les milieux naturels. Dans le premier cas, les sols sont a priori riches en azote et différentes formes aqueuses de l'azote existent (de la forme la plus oxydées - les nitrates (NO_3^-) à la forme la plus réduite l'ammonium NH_4^+). Pour le modèle, c'est donc la forme ammonium qui nous intéresse car elle est la source des échanges d'ammoniac.

Pour les sols d'écosystèmes naturels, l'azote est souvent limitant pour les plantes et ces sols présentent donc souvent de faibles concentrations en ammonium. Concernant les échanges au niveau du sol, le concept de concentration gazeuse et aqueuse dans le sol est similaire à celui de la cavité sous-stomatique avec un équilibre entre la phase gazeuse et la phase aqueuse régit par l'équilibre de Henry et une concentration en ammonium du sol que l'on peut mesurer ou déterminer à partir d'éléments relatifs à la fertilisation apportée combinée d'approches simplifiées (Massad et al 2010). La source d'ammonium est liée aux processus de minéralisation et déminéralisation dans le sol et aux apports directs d'azote pour les surfaces fertilisées. Des modèles plus complets et mécanistes permettent d'estimer cette concentration en ammonium dans le sol, par exemple le modèle Volt'Air de l'UMR ECOSYS (Garcia et al., 2011; Générumont and Cellier, 1997). Considérant que l'ammonium n'est présent que dans le réservoir de sol qui est dit « humide », la résistance de surface du sol pour la vapeur d'eau est utilisée pour calculer la résistance du sol aux transferts de l'ammoniac depuis ce réservoir. Il est en effet considéré que l'ammoniac gazeux prend son origine depuis la zone humide du sol et traverse, tout comme la vapeur d'eau la couche sèche du sol.

Le potentiel d'émission, déterminant des échanges sol-atmosphère et plante-atmosphère

A partir de ces éléments génériques pour le sol et la feuille, l'adaptation du schéma d'échange pour l'ammoniac repose sur la détermination de la concentration en ammonium et du pH des phases aqueuses de la feuille et du sol. Le rapport de la concentration en NH_4^+ sur la concentration en ions H^+ est appelé le potentiel d'émission Γ . En se fondant sur la loi de Henry, sur l'équilibre acido-basique $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3\text{aq}$, et sur la détermination du potentiel d'émission, l'équation [10] donne la concentration gazeuse dans le sol et la plante en fonction de la température. Actuellement, la détermination expérimentale de la concentration en ammonium et le pH de l'apoplasme des feuilles est complexe et n'est pas une mesure de routine sur les plantes (Husted et al., 1996 ; Personne et al., 2015). Il n'existe à ma connaissance pas de modélisation mécaniste permettant de connaître le potentiel d'émission des plantes en fonction du type de plante, de son développement, du sol sur lequel elles poussent et des fertilisations de la zone étudiée.

- Concernant le transfert au niveau des cuticules, il est souvent considéré que la forme majoritaire de l'échange entre l'ammoniac gazeux et la cuticule est le dépôt. Plusieurs études montrent un poids important de l'humidité relative sur ce dépôt

$$R_{cut}^{NH3} = R_{cut_min}^{NH3} \times \exp\left(\frac{100-RH}{7}\right)$$

[11]

(Wentworth et al., 2016). En effet, la forte dépendance du dépôt cuticulaire à l'état hydrique de l'air s'explique par la présence de microgouttes sur les surfaces (Flechard et al., 1999 ; Burkhardt et al., 2009). Elle est modélisée par défaut dans SurfAtm selon une dépendance exponentielle à l'humidité relative avec la paramétrisation la plus consensuelle issue des travaux de Milford et al. (2001) et Sutton et al. (2001) incluant une valeur de résistance minimale pour chaque type de plante ($R_{cut_min}^{NH3}$) (équation [11]). A l'aide du modèle couplé énergie, eau, polluant, le modèle SurfAtm-NH3 permet d'utiliser l'état hydrique de l'air du couvert (accessible par la pression de vapeur dans l'air du couvert q_{couv}) afin de se rapprocher des conditions microclimatiques auxquelles les cuticules des feuilles sont soumises et non plus l'humidité relative de l'air à la hauteur de référence comme c'est souvent le cas.

Echanges Cuticulaires

ADAPTATION AU CAS DE LA MODELISATION DU DEPOT D'OZONE

L'ozone est classé comme le 33^{ème} facteur de risque en termes de mortalité du fait de ses impacts sur les maladies chroniques respiratoires (HEI, 2018) . Les preuves épidémiologiques sont en effet de plus en plus nombreuses et la disponibilité croissante des données de pollutions croisée avec les décès donne des estimations récentes indiquant qu'en 2013, dans l'UE-28, 16 000 décès prématurés, soit l'équivalent de 192 000 années de vie perdues, sont attribuables à l'exposition à l'ozone (Nuvolone et al., 2018). Sur le plan de la santé à moyen et long terme, l'un des défis consiste à déterminer quelle est le meilleur indicateur de l'exposition à l'ozone, étant donné que l'ozone présente des variations diurnes et saisonnières importantes. Une question est de savoir si des épisodes répétés d'exposition à de fortes concentrations à court terme peuvent entraîner des effets durables sur la santé au-delà des effets aigus observés. Il n'est pas facile de répondre à cette question, car certains des effets aigus de l'ozone sont connus pour être réversibles.

Enjeux de mieux évaluer les échanges d'ozone

Ces mêmes effets et ces mêmes questions se posent au niveau des espaces agricoles et naturels car, compte tenu des capacités oxydatives de ce gaz, les dégâts sont nombreux sur le fonctionnement des agro et écosystèmes (Emberson, 2020 ; Castell and Le Thiec, 2017) avec, par exemple des conséquences sur les capacités de production alimentaires mondiales et des pertes parfois supérieures à 15% selon les cultures et les régions (Avnery et al., 2011). Une méta-analyse des études sur les effets des niveaux d'ozone ambiants comparés aux niveaux préindustriels a révélé des pertes de rendement du blé significatives, dépassant les 8%, tous cultivars et âges des cultivars confondus (Pleijel et al., 2018). Par ailleurs, sur les forêts, les prairies et les autres écosystèmes, des nombreux impacts sont aussi bien connus et font l'objet de plusieurs synthèses récentes (Fuhrer et al., 2016 ; Bergmann et al., 2017 ; Grulke and Heath, 2020 ; Emberson, 2020) montrant leur rôle sur la réduction de leur biodiversité, la réduction de leur productivité ou l'augmentation de leur sensibilité au développement de maladies.

Aujourd'hui, si les processus majeurs des réactions chimiques dans l'air (Kramm et al., 1995) et la prévision des niveaux de pollution atmosphérique à l'ozone ont atteint un niveau de maturité suffisant pour anticiper les pics d'ozone estivaux (par exemple le système de prévision français PREV'AIR par exemple –(Rouil et al., 2009)) et ainsi mettre en place des politiques de réduction ponctuelle de la circulation automobile avec quelques jours d'avance, les perspectives de recherche se situent selon moi sur les effets des croisements entre ozone, changements climatiques et modification d'occupation de l'espace. Je n'ai trouvé que deux études sur ce triple croisement (Jiang et al., 2008 ; Ganzeveld et al., 2010) en revanche, les investissements en recherche sont consacrés majoritairement aux impacts environnementaux.

Etat des connaissances

L'UMR ECOSYS s'est investi dans les études des échanges d'ozone avec les surfaces agricoles depuis le début des années 2000, avec un premier projet du programme PRIMEQUAL (rapport final BioPoll'Atm⁵, 2004) ce qui m'a permis de construire les premières adaptations du modèle SurfAtm à l'ozone consolidés par des études complémentaires que j'ai co-encadrées (stages de E. Compagnon 2005⁶ , L. Le Berre 2008⁷)

⁵ BioPollAtm : biosphère et pollution atmosphérique en zone rurale et péri-urbaine. Programme Primequal. Rapport final, Cellier P., 2004.

⁶ Stage de M2 2005, E. Compagnon, Analyse et modélisation du dépôt d'ozone sur un couvert végétal.

⁷ Stage de M2 2008, L. Le Berre, Modélisation biophysique des échanges d'ozone entre le sol, la plante et l'atmosphère

Prise en compte
des processus
connus

puis que j'ai poursuivis au sein du projet ANR Vulnoz⁸ et finalisée par le travail de thèse de P. Stella.

Les travaux menés en adaptant le modèle SurfAtm aux échanges d'ozone avec les couverts ont permis de contribuer à une évaluation quantitative des échanges avec les surfaces biogéniques en distinguant le dépôt au sol de celui sur la végétation. Les adaptations spécifiques pour les échanges d'ozone sont, comme pour le cas de l'ammoniac, fondées sur la transposition des résistances pour la vapeur d'eau au gaz ozone. Les transferts turbulents ne sont pas modifiés, les résistances de couche limite sont adaptées en tenant compte de la diffusivité de l'ozone différente de celle de la vapeur d'eau (voir les équations [3], [4] et [5] précédentes).

Compte tenu des connaissances sur l'ozone, trois hypothèses importantes sont introduites pour l'adaptation du schéma générique au cas des échanges d'ozone entre l'atmosphère et les surfaces biogéniques :

- 1- Les réactions chimiques de l'ozone avec les autres gaz (oxydes d'azote [NOx] notamment) pendant le temps des échanges entre le niveau de référence (quelques mètres au maximum) et la surface de végétation ou du sol sont souvent négligeables et ne modifient pas les gradients de concentration de l'ozone dans les espaces ruraux, éloignés des sources intenses de NOx (Galmarini et al., 1997).
- 2- La réactivité de l'ozone sur les surfaces est telle que l'on fait l'hypothèse que la concentration en ozone est proche de zéro dans la cavité sous-stomatique sur la base des travaux de Laisk et al. (1989) et Wang et al. (1995).
- 3- Le détail des réactions de l'ozone directement sur les surfaces de sol et de la cuticule n'étant pas connu, le dépôt sur ces surfaces est paramétré avec des approches empiriques qui sont décrites ci-dessous.

L'hypothèse 1 permet de rester dans le cadre du flux conservatif dans la couche d'atmosphère étudiée, l'hypothèse 2 est explorée dans l'équipe Eco&Phy notamment à l'aide d'un modèle détaillé précisant le devenir de l'ozone et sa détoxification au sein des cellules (Tuzet et al., 2011 ; Tuzet et al., 2019). Cette simplification de la concentration d'ozone nulle dans la cavité sous-stomatique est valide dans une première approche, en particulier à un pas de temps infra-horaire.

⁸ Projet ANR 2008-2012, Vulnérabilité des agro-systèmes à l'ozone : Quels risques à l'horizon 2020-2030 ? ». projet ANR Vulnérabilité Milieux, Climat Société.

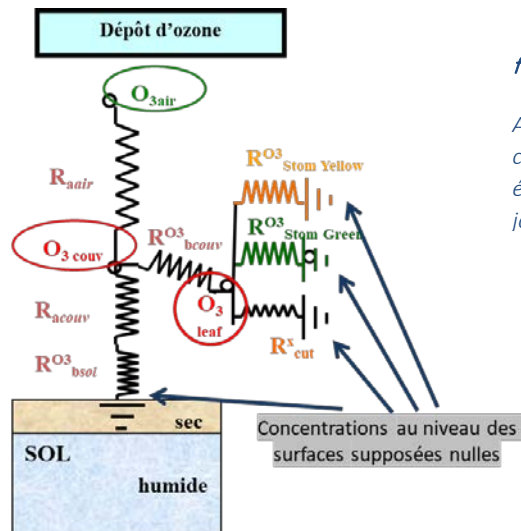


figure 5 : schéma resistif pour SurfAtm-O3.

Au schéma initial (figure 3) est ajoutée une résistance complémentaire au niveau foliaire, relative aux échanges avec les feuilles en sénescence, dites “feuilles jaunes” (indices yellow).

Echanges stomatiques

- Concernant les échanges stomatiques, on se fonde donc sur l'hypothèse d'une concentration nulle dans la cavité sous-stomatique que Laisk et al 1989 ont expérimentalement validée. Par ailleurs, afin de travailler sur des cycles entiers de végétation et sachant la concomitance des épisodes de pollution atmosphérique à l'ozone avec des végétations en situation de sénescence (période estivale), nous avons intégré une voie d'échange supplémentaire entre l'atmosphère et la végétation en distinguant la surface verte et la surface sénescente de la végétation (feuilles jaunes) comme l'illustre la **figure 5** (Stella et al., 2011b). Cette distinction feuilles jaunes / feuilles vertes a permis d'introduire les surfaces sénescentes inactives sur le plan de la transpiration compte tenu du vieillissement voire de l'assèchement des cellules de la cavité sous-stomatique tout en permettant le maintien du dépôt pour l'ozone au travers ces stomates.

La conductance stomatique pour les feuilles jaunes se distingue de celle des feuilles vertes :

$$R_{stom}^{green} = R_{stom}^{leaf_scale} / LAI_e^{green}$$

$$R_{stom}^{yellow} = R_{stom}^{leaf_scale} / LAI_e^{yellow} \quad [12]$$

Avec la résistance stomatique foliaire R_{stom} calculée selon l'approche de Jarvis et paramétrée selon Emberson et al 2000 et Tuovinen et al 2004. Les surfaces foliaires données par les LAI (Leaf Area Index) sont corrigées d'un facteur d'ombrage et convectif (« shielding effect ») expliqué dans (Rochette et al., 1991).

Echanges avec le sol

- Concernant l'adaptation des échanges d'ozone avec le sol, plusieurs travaux ont montré une corrélation avec l'état hydrique de l'air, et notamment avec l'humidité relative en contact avec le sol (Stella et al., 2011a), équation [13]. L'adaptation du modèle SurfAtm à l'ozone intègre donc l'humidité relative à la surface du sol (RH_{surf_sol}) pour se focaliser sur la variable microclimatique « localement pertinente ». Cette intégration s'est fondée sur un diagnostic de résultats expérimentaux avec une analyse de situations pédoclimatiques variée.

Résistance au dépôt sur le sol

$$R_{sol}^{O_3} = R_{sol_min}^{O_3} (k_{sol} \times RH_{surf_sol}) \quad [13]$$

avec $R_{soil_min} (= 21.15 \text{ s m}^{-1})$ et $k_{sol} (= 0.024)$

Echanges Cuticulaires

- Concernant l'adaptation des échanges avec les cuticules, on se réfère ici aux travaux de Lamaud et al. (2009) qui établissent un lien clair entre la résistance cuticulaire au dépôt et l'humidité relative au niveau des feuilles (RH_{leaf}).

Résistance au dépôt sur les cuticules :

$$R_{cut} = R_{cut_{max}} \quad \text{si } RH_{leaf} < RH_0 \quad [14]$$

$$R_{cut} = R_{cut_{max}} \left(-k_{cut} \cdot (RH_{leaf} - RH_0) \right) \quad \text{si } RH_{leaf} > RH_0 \quad [15]$$

avec $R_{cut_{max}}$ (= 5000/LAI), RH_0 (= 60%) et k_{cut} (= 0.045)

Par rapport aux modèles dont l'objectif finalisé est la prédiction des flux horaires ou journaliers pour les problématiques prévision de la qualité de l'air, l'adaptation du modèle SurfAtm à l'ozone avait en complément l'objectif de quantifier l'ozone déposé sur des agro et écosystèmes pour mieux aborder les impacts sur la croissance et la productivité des surfaces naturelles (projet VulnOz). En conséquence, le modèle est adapté aux cycles annuels d'une surface naturelle allant d'un sol nu à une surface couvrante en végétation en intégrant la phase de sénescence de la végétation avec l'apparition des feuilles jaunes qui ont un fonctionnement différent sur le plan hydrique mais qui restent une voie de dépôt pour l'ozone. Cette distinction feuilles vertes/feuilles jaunes est une originalité du modèle en représentant les flux transpiratoires qui diminuent avec l'arrivée des feuilles jaunes compte tenu d'un moins bon fonctionnement des circuits hydrauliques et de la déshydratation des surfaces jaunissantes (Locke and Ort, 2014 ; Scholz et al., 2014) sans pour autant que l'ouverture stomatique ne diminue sensiblement permettant alors un maintien du dépôt d'ozone au sein des stomates ouverts.

Ce travail de développement et d'intégration des connaissances a été supporté majoritairement par les travaux issus des projets BioPollAtm et VulnOz, des collaborations entre les équipes et du travail de thèse de P. Stella.

Enjeux de mieux évaluer les échanges de pesticides

La présence des pesticides dans l'air est documentée depuis les années 70-80 avec les premiers travaux de Spencer and Cliath (1973) sur la volatilisation dans l'environnement puis, par exemple Harper et al. (1983) ou Glotfelty et al., (1984) et des revues d'ensemble plus récentes (Bedos et al., 2002 ; Lichiheb et al. 2015a ou Majewski and Capel, 2019). Toutefois, la contamination de l'air aux pesticides est moins bien documentée que la contamination de l'eau et de l'alimentation et les conséquences systémiques des dépôts sur les écosystèmes sont mal connus. L'ANSES, dans un récent rapport (ANSES 2017) recommande une surveillance pérenne de la concentration de pesticides dans l'air. A ce jour, ce champ d'investigation scientifique sur les émissions diffuses dans l'atmosphère et son dépôt sur la biosphère rencontre une difficulté technique majeure pour mesurer ces composants aux propriétés chimiques, physiques très diverses et à de très faibles concentrations dans l'air, souvent de l'ordre du nanogramme de pesticide par mètre cube. Pour situer les concentrations en jeu pour les pesticides par rapport aux deux précédents gaz étudiés, la concentration ambiante d'ozone considérée comme une concentration de fond sans effet sur les agrosystèmes est de 40 ppb (env. 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et les concentrations de fond en hiver se situent autour de 5 à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ qui est la saison de très faible concentration d'ozone dans l'hémisphère nord. Pour l'ammoniac, les concentrations de fond sont dix fois inférieures, ils se situent autour de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ variant du dixième à la dizaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon les périodes de l'année et notamment de la proximité géographique et temporelle des sources (élevage et apport d'engrais ; des pics de plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ peuvent avoir lieu mais sur une durée de quelques heures à quelques jours au maximum). En comparaison, les pesticides sont 10 à 1000 fois moins concentrés dans l'air que l'ozone ou l'ammoniac. Outre la difficulté de mesurer ces très faibles concentrations, les techniques de mesures doivent s'adapter à la famille chimique des composés étudiée. La communauté scientifique et celle de la surveillance de la qualité de l'air ont donc un niveau de connaissances médiocre sur les pesticides dans l'air et pourtant les impacts sont nombreux et encore mal connus sur la santé (rapport INSERM, 2013)) et sur l'environnement (Sharma et al., 2019). La présence des pesticides dans l'air provient des pertes au moment de l'application par dérive (les gouttelettes se dispersent et tombent en dehors de la cible) ou bien pendant cette période d'application, les gouttelettes peuvent être reprises par la convection atmosphérique et alors se retrouver dans l'atmosphère sous des formes particulières ou se volatiliser sous leur forme gazeuse. La contribution de ce second phénomène à la pollution atmosphérique aux pesticides est considérée faible car très ponctuelle.

De plus, ce qui est encore moins connu et pourtant important en quantité perdue concerne la volatilisation après l'application, de 0,1% du produit appliqué à 90% selon le composé, la surface de dépôt et les conditions météorologiques d'application selon Bedos et al. (2002). En effet, le produit une fois appliqué reste un certain temps sur la surface (feuilles et sol) et plusieurs mécanismes vont entrer en jeu notamment sa volatilisation qui va conduire à une émission gazeuse du pesticide dans l'air et alors une dispersion au gré du déplacement de la masse d'air, le gaz en question rentrant dans la composition de l'air tant que le composé n'est pas déposé ou détruit.

Très peu de modèles traitent de ce phénomène de volatilisation après l'application. Il faut intégrer plusieurs mécanismes physico-chimiques avec le processus de volatilisation une fois le pesticide déposé sur la culture : la volatilisation est en compétition avec la pénétration du pesticide dans les feuilles ou le sol et avec sa dégradation sur les surfaces (de feuille ou de sol), le plus souvent sa photodégradation. L'étude en simultanée des

Etat des connaissances

processus de volatilisation, de pénétration foliaire et de photodégradation est donc un challenge car les mesures de chaque processus ne sont en général pas techniquement faisables conjointement.

Investir dans ce domaine a donc été un enjeu scientifique et technique pour produire les premiers outils de modélisation permettant de quantifier les échanges biosphère-atmosphère de pesticides. Nous ne nous intéressons ici qu'au phénomène de volatilisation après application du produit avec le souci de représenter aussi bien que possible les conditions micro-météorologiques du couvert et d'état hydrique des surfaces du sol et des feuilles, qui influencent la volatilisation des pesticides (Harper et al., 1976 ; Taylor et al., 2019).

Dans ce cadre, les travaux que j'ai menés avec mes collègues (notamment C. Bedos de l'UMR ECOSYS et le co-encadrement de N. Lichiheb) ont permis de réaliser l'adaptation du modèle générique SurfAtm aux pesticides (Lichiheb et al., 2014). Actuellement le modèle SurfAtm-Pesticides est en cours d'intégration dans le modèle CHIMERE (modèle de chimie / transport de l'IPSL et déployé par l'INERIS - Menut et al., 2021) pour étudier la spatialisation des champs de pollution aux pesticides et pour estimer l'impact des pratiques agricoles sur la dispersion atmosphérique à l'échelle régionale). Ce travail est conjointement mené avec les équipes de l'INERIS.

Pour évaluer la part de pesticide appliquée qui se volatilise après application dans les parcelles agricoles, nous nous sommes inspirés des travaux de Leistra et Wolters (2004) qui ont précisé le devenir des pesticides déposés sur les surfaces des feuilles : rester adsorbé, pénétrer ou se dégrader au niveau des surfaces de sol et de plante.

La volatilisation d'un composé gazeux initialement déposé sous forme liquide dépend de la pression de vapeur du pesticide en question. Cette pression de vapeur répond classiquement à la loi de Clausius Clapeyron et est donc dépendante de la température (équation [16]). On peut alors calculer de manière mécaniste la concentration de pesticide sous forme gazeuse au niveau de la surface (équations [17] et [18]) en tenant compte de la quantité de pesticide liquide sur la surface Q (voir l'équation [19] décrite ci-dessous).

L'adaptation du modèle au cas de la volatilisation des pesticides après une

Prise en compte
des processus
connus

$$P_{sat}(T) = P_{sat(ref)} \exp\left(\frac{\Delta H_{vap} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{leaf}}\right)}{R}\right) \quad [16]$$

$P_{sat(ref)}$ est la pression de vapeur de référence (Pa) à la température T_{ref} , ΔH_{vap} l'enthalpie de vaporisation, et T_{leaf} la température du couvert (dans l'équation en K). En général, T_{ref} (K) est donné à 298 K (25°C).

χ_{leaf} est la concentration du pesticide à la surface des feuilles

$$\chi_{leaf} = \frac{P_{sat}(T)}{RT} M \quad [17]$$

avec M la masse moléculaire du pesticide étudié.

$$\chi_{leaf\,eff} = \chi_{leaf} \frac{Q(t)}{\lambda} \quad [18]$$

$\chi_{leaf\,eff}$ est la concentration effectivement disponible pour la volatilisation. Elle décroît proportionnellement à la perte du pesticide étudié $Q(t)$ sur la plante au temps t ($\mu\text{g m}^{-2}$). λ est la masse surfacique d'une couche moléculaire de pesticide sur la plante ($=105 \mu\text{g m}^{-2}$) (Leistra and Wolters, 2004)

application est limitée dans un premier temps aux processus qui se déroulent au niveau de la surface des feuilles (sans prise en compte du niveau du sol). En effet, avant de complexifier, nous sommes partis de l'hypothèse que le pesticide ne peut se volatiliser que depuis les surfaces foliaires et non pas depuis le sol pour éviter la problématique des émissions multi-sources. Il a par ailleurs été supposé que la voie d'échange stomatique était négligeable pour les pesticides. Dans ce cadre, le schéma d'échange pour analyser les résultats est simplifié en ne tenant compte que de l'échange depuis la surface foliaire, même si tout ce qui concerne les échanges d'énergie et d'eau restent identiques aux précédentes descriptions. L'adaptation de l'approche générique au cas de la volatilisation des pesticides est illustrée sur la **figure 6**. On notera que la voie stomatique n'est pas représentée pour les pesticides car supposée négligeable.

Le couplage entre le schéma générique pour l'énergie et l'eau et le schéma pour les pesticides se fait de manière similaire aux autres gaz avec la température des surfaces calculée, laquelle température pilote localement la pression de vapeur du pesticide (équation[16]) au niveau de la feuille.

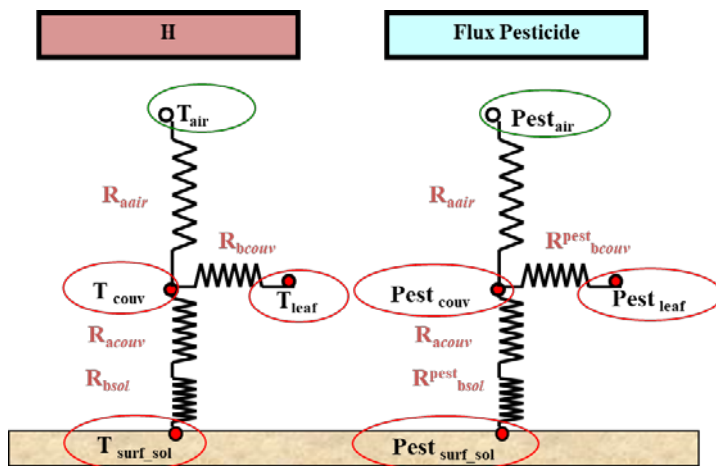


figure 6: schéma résistif pour les pesticides et la chaleur.

L'absorption stomatique des pesticides est supposée négligeable et donc les voies stomatiques ne sont pas représentées pour la volatilisation des polluants « Pesticides ».

Nous avons introduit un élément nouveau dans la modélisation générique en tenant compte du réservoir de pesticide lié à la quantité déposée qui évolue dans le temps en fonction de la volatilisation elle-même. Cette introduction du devenir du pesticide permet de réaliser le bilan du pesticide au cours du temps en intégrant les processus de pénétration dans la cuticule et la photodégradation du produit (équation[19]). La quantité de pesticide à la surface des feuilles

$$Q(t) = Q(t^{-1}) - [F_V - (k_{pen} + k_{deg})][Q(t^{-1})] \cdot \Delta t$$

[19]

($Q(t)$), susceptible de se volatiliser, est réduite pendant le pas de temps Δt du fait *i/* de sa volatilisation F_v , *ii/* de sa dégradation et *iii/* de sa pénétration avec une cinétique de disparition d'ordre 1 pour chaque pas de temps (respectivement dépendant des coefficients k_{pen} et k_{deg} de cette cinétique).

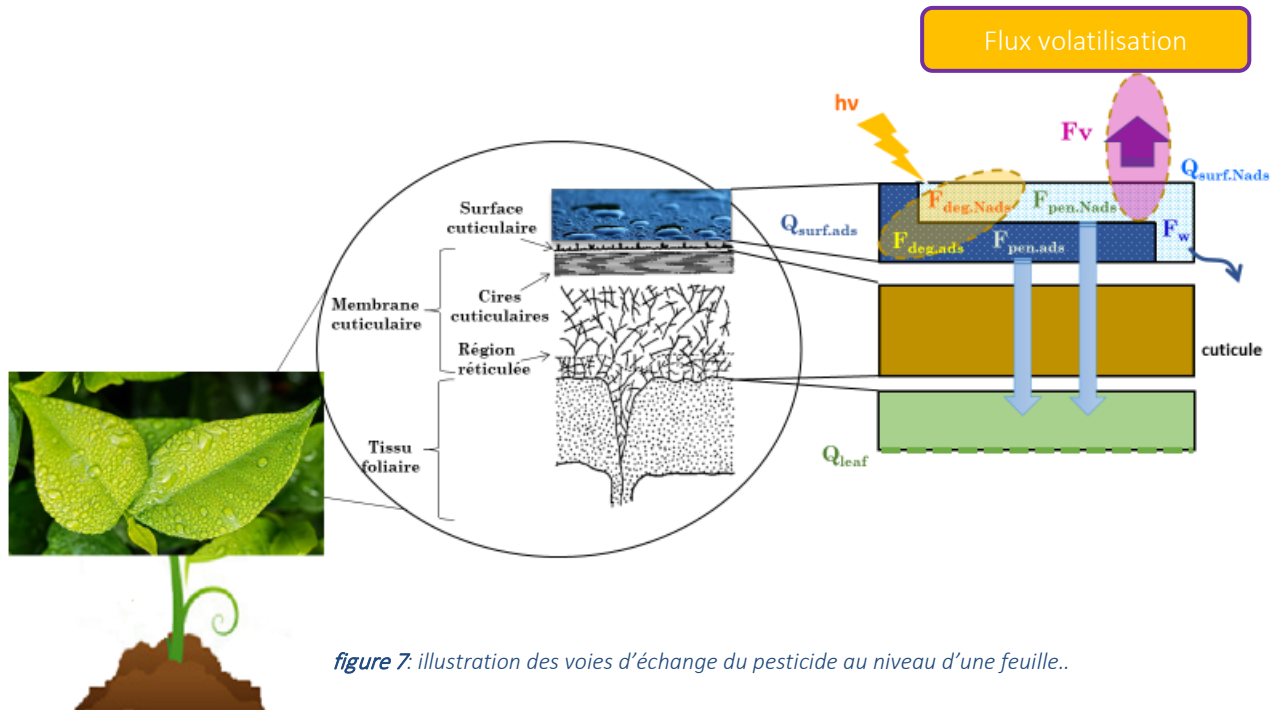


figure 7: illustration des voies d'échange du pesticide au niveau d'une feuille..

Six flux sont intégrés pour calculer le devenir du pesticide déposé sur les feuilles, ceux des composés non adsorbés sur la cuticule $F_{deg.Nads}$, $F_{pen.Nads}$ qui sont liés à la photodégradation et à la pénétration du pesticide dans le tissu foliaire et F_w et F_v qui représentent le lessivage et la volatilisation. Parmi ces six flux, deux dépendent d'une quantité adsorbée sur la cuticule, le flux de photodégradation ($F_{deg.ads}$) et celui de la pénétration ($F_{deg.ads}$). Ils dépendent des quantités en surface non adsorbées ($Q_{s.nads}$), en surface adsorbées ($Q_{s.ads}$).

A l'issue d'expérimentations à l'aide de molécules marquées, nous avons identifié trois types de compartiments au niveau de la feuille où les pesticides se retrouvaient (Lichiheb et al., 2015b) : la molécule active du pesticide peut être considérée comme libre pour la volatilisation au niveau de la zone supérieure de la « goutte » déposée (indice s.nads – « surface non-adsorbé »), ou alors être partiellement adsorbé sur la cuticule, non disponible à la volatilisation mais pas encore pénétrée dans le tissu foliaire (indice s.ads – « surface adsorbé ») ou finalement dans le tissu foliaire (la molécule active est dans la feuille).

Cette schématisation est illustrée sur la **figure 7** qui définit une quantité totale de pesticide Q_{tot} qui se répartit entre deux compartiments : celui de la feuille (part du produit ayant pénétré dans le tissu foliaire (Q_{leaf})) et celui de la surface des feuille Q_{surf} (équation [20]). A son tour, la part restée à la surface des feuilles est décomposée en deux sous-éléments (équation [21]) : la partie adsorbés (indice surf.ads,) et la partie libre (indice surf.Nad). Cette dernière est dépendante de la lipophilie de la molécule au contact de la partie cireuse de la cuticule, estimée par le coefficient de répartition du pesticide entre l'octanol et l'eau K_{ow} et de la quantité totale en surface (Q_{surf}) (équation [22])

Nous avons donc complété le schéma en tenant compte de trois réservoirs et des transferts entre réservoirs. Une relation a été trouvée expérimentalement pour calculer la part de produit adsorbée par rapport à la part totale qui n'a pas encore pénétré dans le tissu foliaire (équation [20] ; Lichiheb et al., 2016).

Développements spécifiques

Avec cette décomposition, la volatilisation du pesticide F_v dépend de la quantité du seul compartiment définissant la quantité de pesticide à la surface des feuilles et non adsorbée ($Q_{surf.Nads}$).

$$Q_{tot} = Q_{surf} + Q_{leaf} \quad [20]$$

Avec $Q_{surf} = Q_{surf.Nads} + Q_{surf.ads}$ [21]
 et

$$Q_{surf.ads} = (0.7 \times \log Kow - 1.7) \times Q_{surf} \quad [22]$$

Sur le principe de la relation flux-gradient (équation [1] et [2]), la volatilisation est donc calculée selon l'équation suivante :

$$F_v = -\frac{1}{R_{bcp}} (\chi_{couv} - \chi_{leaf_eff}) \quad [23]$$

χ_{leaf_eff} est donnée par la quantité disponible à la volatilisation ($Q_{surf.Nads}$) à l'aide l'équation [18] précédente.

Ces travaux de mise au point du modèle SurfAtm-Pesticides, ont donc porté sur le devenir de la matière active et sa pénétration dans le tissu foliaire, son adsorption sur la cuticule et sa disparition par (photo)dégradation. Ces développements ouvrent la voie à des études de processus sur le devenir de la matière active et de son évolution au sein des différents compartiments de la plante. Le modèle pourrait être utile pour des études sur les résidus de pesticides dans et sur les plantes, mais il n'est à ce jour pas utilisé en ce sens bien qu'il offre ce potentiel.

ANALYSER LES RESULTATS DE SIMULATIONS DES ECHANGES BIOSPHERE-ATMOSPHERE AVEC LE MODELE SURFATM

La finalité de nombreux modèles biophysiques est de prédire un ou plusieurs phénomènes sans avoir besoin de les mesurer. On parle de plus en plus d'expérimentations numériques et c'est une voie explorée pour la prévision et la scénarisation.

Toutefois, le travail de modélisation peut aussi s'inscrire dans une démarche de recherche de processus « manquants ». En effet, en tant que chercheur-modélisateur, on est souvent satisfait de constater un bon accord entre des sorties d'un modèle et des mesures, ce qui est souvent utilisé pour une démonstration de la validité du modèle. Toutefois, constater des différences entre des sorties de modèles et des mesures permet aussi de mener un travail de détermination des processus non-pris en compte dans la modélisation.

SurfAtm a été utilisé dans cette voie pour mieux comprendre voire caractériser de nouveaux processus, pour identifier des sources ou puits ou pour établir des bilans de pertes ou apports sur la biosphère.

DIAGNOSTIC SUR LES SOURCES ET LES PUIITS

J'ai choisi de présenter trois exemples portant sur l'ammoniac, l'ozone et les pesticides, pour illustrer les interprétations et productions de connaissances faites à partir du modèle en comparaison des mesures.

- Exploration de l'enchaînement des déterminants de l'émission d'ammoniac après épandage de lisier

Exemple
d'analyse
combinée
modélisation-
paramétrisation-
mesures

Etudes sur
l'ammoniac

F. Tardy, stage de
M2, 2014.

A l'aide du modèle SurfAtm-NH₃, lors d'une expérimentation en 2014 sur du blé après un épandage de lisier, nous avons confirmé l'enchaînement de trois étapes distinctes de disponibilité de l'ammoniac à la volatilisation à l'aide de trois options/scénarios pour les processus d'émission du sol (Personne et al., 2015)). Nous avons testé les déterminants de l'émission de l'ammoniac depuis le sol pour les 30 premiers jours suivant un apport de lisier avec trois options de calcul de la résistance de surface du sol au cours du temps : R0 – pas de résistance, R1 – résistance formée par l'assèchement de la surface de sol et R3- résistance contrôlée par l'humidité relative de l'air. La **figure 8** illustre la comparaison modèle-mesures selon ces trois options de résistance. Cela a permis d'identifier trois périodes différentes pour les déterminants de l'émission d'ammoniac – notamment en identifiant les configurations durant lesquelles les divergences modèle-mesure étaient importantes. En synthèse, ce qu'il a été déduit c'est qu'immédiatement après épandage, l'ammoniac est directement disponible depuis le liquide appliqué pendant la première journée (la configuration R0 est la plus satisfaisante), les deux jours suivants, l'ammoniac provient a priori de la phase aqueuse du lisier qui s'est incorporée dans le sol et l'assèchement de la surface freine alors l'émission en formant une résistance dépendante de l'évaporation (la configuration R1 reproduit la dynamique et l'amplitude des flux sur les deux jours) puis les jours suivants, l'émission d'ammoniac provient de ce qui est partiellement adsorbé sur les phases solide du sol compte tenu du fait que l'émission

devient dépendante de l'humidité relative de l'air à l'instar de ce qu'il se passe au niveau de la cuticule (configuration R2).

Il reste toutefois admis que c'est au niveau de cette interface sol-lisier-atmosphère que les incertitudes sont les plus élevées et qu'un manque de connaissances est encore présent (Jiang et al., 2017), notamment parce que chaque situation de sol (humidité et propriétés physiques et chimiques), de type de lisier (pH initial, densité) et de facilité d'infiltration nécessite une adaptation importante à la situation rencontrée.

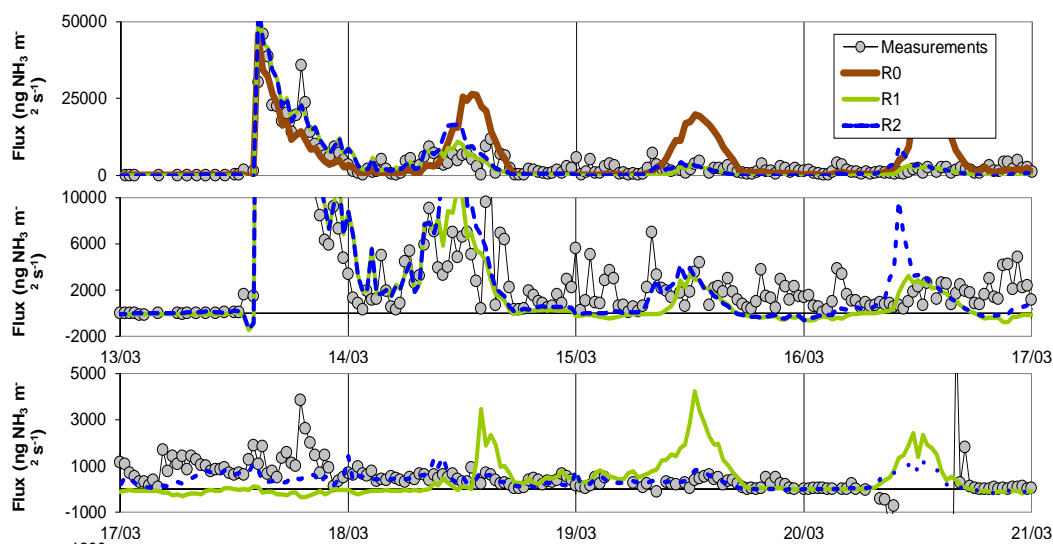


figure 8: Comparaison des flux simulés (courbes) et mesurés (points) selon trois options de résistance de surface du sol ($R_{\text{soil-surface}}$).

Les deux premiers panneaux de la figure représentent la même séquence du 13 au 17 mars mais avec un zoom sur l'axe des y sur le second panneau. Le troisième panneau est la séquence temporelle suivante du 17 au 21 mars. R0, R1 et R2 sont les résistances de surface respectivement « sans résistance », dépendante de l'assèchement de la surface du sol du fait de l'évaporation puis dépendante de l'humidité relative de l'air.

- Identification d'un puits d'ozone supplémentaire et aux caractéristiques différentes pour un couvert en sénescence

Exemple
d'analyse
combinée
modélisation-
paramétrisation-
mesures

Etudes sur le
dépôt d'ozone

P. Stella, Thèse
2011

Concernant le dépôt d'ozone, il se répartit entre le sol et la plante et nos travaux ont fait émerger la nécessité d'introduire un dépôt sur les surfaces de feuilles en sénescence (feuilles « jaunes ») pour des études sur de longues périodes, que ces feuilles jaunes soient encore actives ou totalement sèches. Ces surfaces sénescentes sont négligées et absentes de la grande majorité des modélisations pour le bilan d'énergie, les flux transpiratoires ou les flux de CO₂ car leur importance est faible pour ces questions. Ces surfaces foliaires sénescentes offrent toutefois une surface d'échange non négligeable ce qui est important pour les processus de dépôt notamment d'ozone. En effet, sans l'introduction de cette surface additionnelle dans le schéma résistif pour la modélisation du dépôt d'ozone, les multiples tentatives de paramétrisation ne parvenaient pas à prédire les flux déposés sur l'ensemble du couvert (plante + sol). La prise en compte d'une voie supplémentaire, spécifique aux feuilles sénescentes, à faible transpiration compte tenu de la dégradation de leur fonctionnement hydrique, a permis la simulation du dépôt de polluant sur les cuticules des feuilles sénescentes et par absorption stomatique des surfaces jaunes encore actives (**figure 9**). Il a pu être rendu compte d'une réduction de la transpiration à l'apparition de feuilles sénescentes sans réduction du dépôt d'ozone puis une seconde phase avec l'assèchement complet du couvert dans (Stella et al., (2011b et 2013).

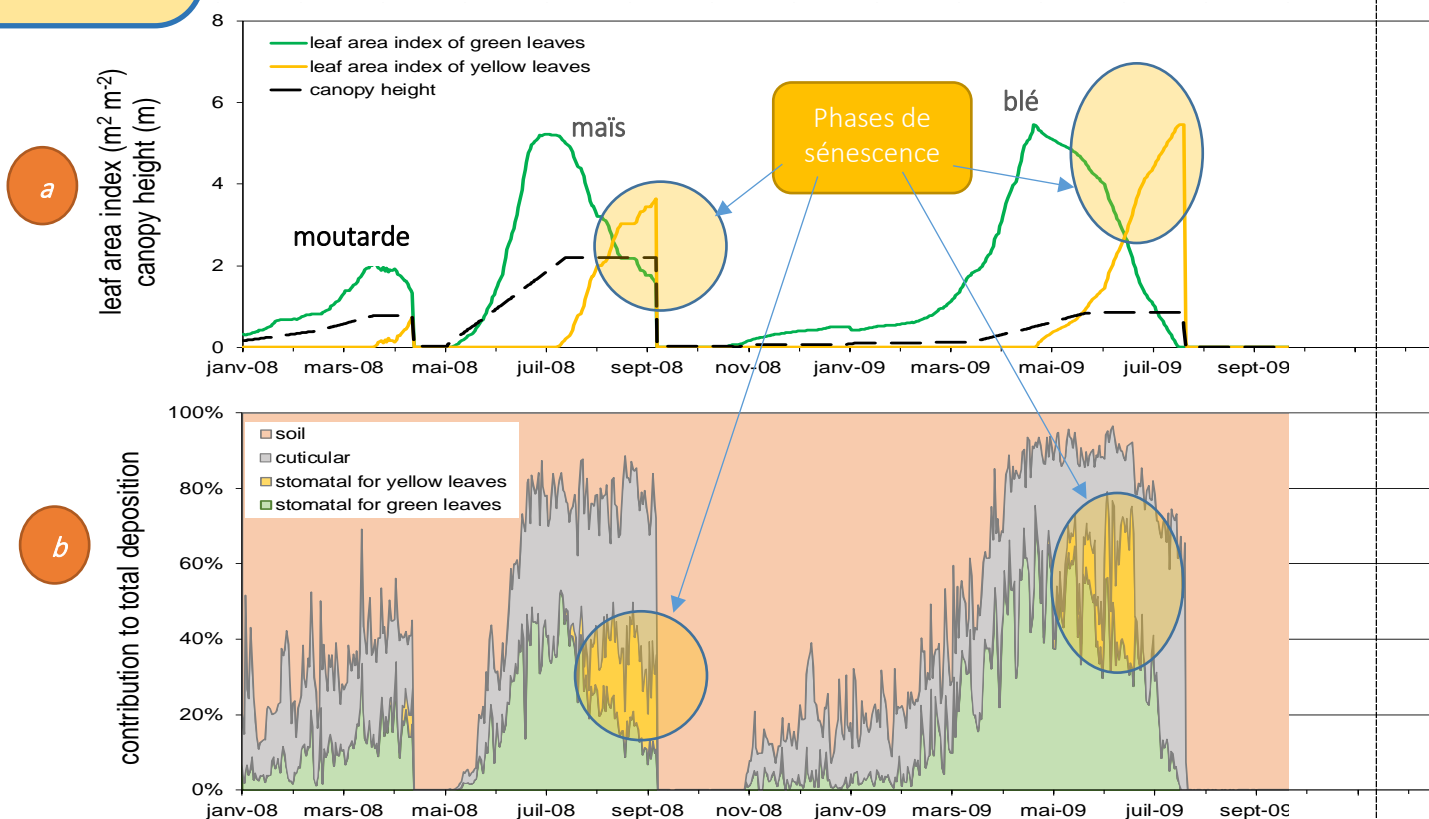


figure 9 : résultats de la simulation du dépôt d'ozone sur une succession culturale (20 mois) de moutarde, maïs puis blé d'hiver. La figure **a** représente la couverture foliaire selon le LAI et la hauteur du couvert et la figure **b** indique la proportion du dépôt sur les différents compartiments de la surface : surface du sol, cuticule, voies stomatiques des feuilles jaunes et des feuilles vertes.

- Investigation pour une meilleure compréhension de la volatilisation de pesticides

Sur un troisième volet de déploiement du modèle SurfAtm, pour les pesticides, les comparaisons modèle-mesures ont permis de tester différentes paramétrisations du devenir des pesticides une fois déposés sur les feuilles. En effet, le modèle SurfAtm-Pesticides décrit finement les différentes voies du devenir des pesticides sous sa forme pure (volatilisation, pénétration, dégradation). Toutefois, la littérature scientifique met en avant le rôle majeur des adjuvants qui visent à améliorer l'efficacité du produit dans sa globalité avec les premiers travaux spécifiques de Stock and Holloway (1993). Les adjuvants aux molécules actives peuvent accélérer la pénétration dans les tissus foliaires pour les pesticides dits « systémiques », d'autres cherchent à maintenir aussi longtemps que possible le pesticide sur les surfaces de feuille pour les produits dits « de contact » (Hazra and Purkait, 2019).

Sachant que les laboratoires publics ne disposent pas des informations sur ces éléments de formulation spécifiques de chaque fabricant (pour des raisons de secret de fabrication industrielle), nous avons pu tester les effets des formulations complètes (molécule active pure + adjuvants). La démonstration des effets de la formulation a été étudiée expérimentalement par comparaison entre une application sur des feuilles de blé avec les molécules actives pures de chlorothalonil et de fenpropidin (le premier étant un produit de contact, l'autre un produit systémique) et les mêmes molécules avec leurs adjuvants. Les résultats présentés dans le papier de Lichiheb et al. (2016) ont permis d'introduire dans le modèle un facteur correctif lié à la formulation au niveau de la solubilité du pesticide et au niveau de sa pression de vapeur et en tenant compte de leur typologie contact/systémique. La **figure 10** illustre que l'on améliore les résultats de la modélisation pour la volatilisation en comparaison des mesures lorsque l'on intègre les effets des adjuvants sur les produits purs.

Ici, selon les produits appliqués, on constate que les adjuvants des produits de contact ont permis de réduire un peu l'émission de pesticides, de 30% pour l'exemple du chlorothalonil car l'objectif de l'adjuvant est de maintenir le produit sur la surface (en limitant sa photodégradation, son lessivage et sa pénétration). En effet, sa pression de vapeur étant faible, il volatilise peu qu'il soit avec ou sans adjuvant. Pour le fenpropidin de la seconde famille de produit (produit systémique), avec sa formulation commerciale, la volatilisation est divisée par dix environ par rapport au produit pur appliqué. La pression de vapeur de ce composé étant élevée, les adjuvants de la molécule cherchent à réduire sa volatilisation potentiellement importante (30 fois plus que le chlorothalonil) pour favoriser rapidement son intégration au sein du tissu des plantes. Si la généralisation de ces valeurs de réduction, de cumuls de produits perdus n'est pas faisable à l'aide d'un tableau type abaque, par type de produit, de plante, de condition climatique, le modèle apporte les moyens de tenir compte des effets de la formulation, des propriétés physico-chimiques des produits pour évaluer leur potentiel de volatilisation.

Exemple
d'analyse
combinée
modélisation-
paramétrisation-
mesures

Etudes sur *les*
pesticides

N. Lichiheb, Thèse
2015

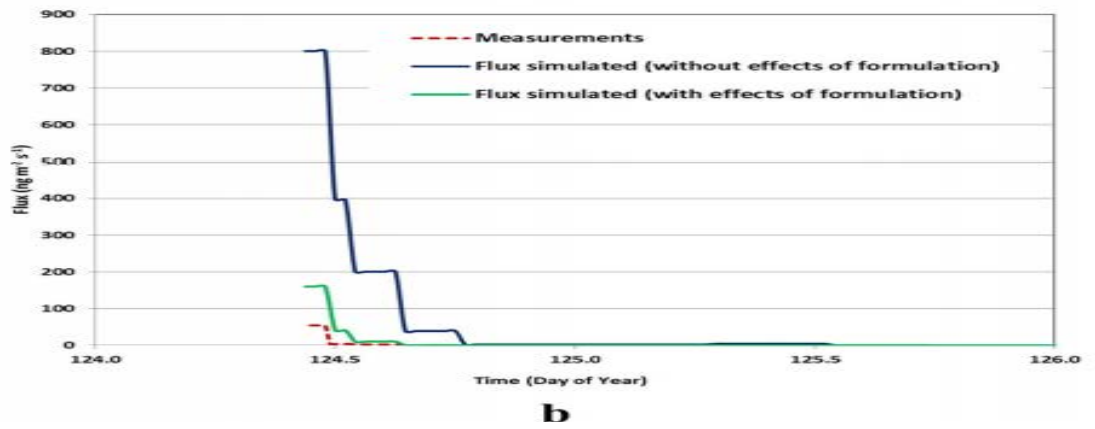
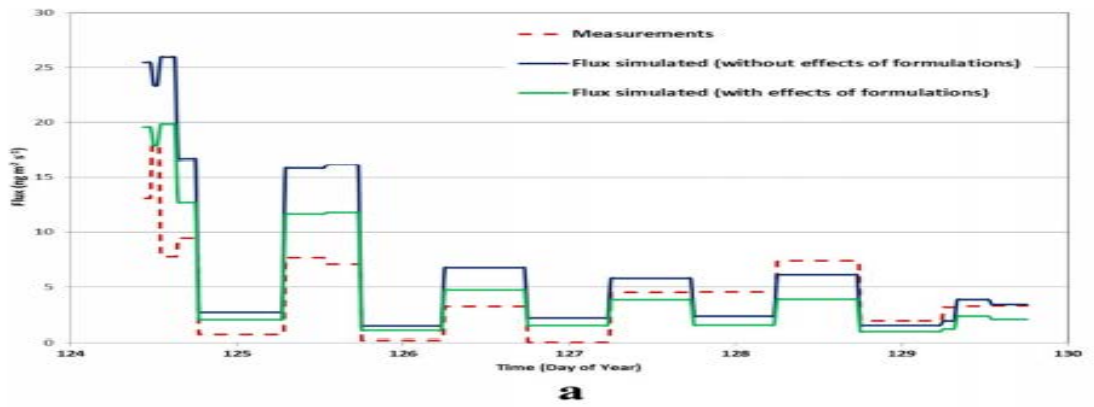


figure 10 : comparaison de la volatilisation mesurée et simulée avec et sans introduction des effets de la formulation (avec et sans adjuvants) ; figure a – chlorathalonil, figure b - fenpropidin.

ETABLIR DES BILANS DES DEPOTS OU D'EMISSION – QUANTIFIER LES ECHANGES SUR LA DUREE

Dans le cas des utilisations d'un schéma résistif pour évaluer les échanges biosphère-atmosphère par le modèle SurfAtm, lorsque les calibrations des paramètres ont été opérés avec succès, c'est-à-dire lorsque les écarts entre les sorties des simulations et les mesures de flux sont considérés suffisamment faibles pour disposer d'une configuration stabilisée sur une période donnée, alors, les expérimentations numériques sur de plus larges périodes permettent de simuler avec une certaine confiance l'ensemble des flux (énergie, eau et polluants) sur une période plus étendue que la période des mesures.

Ainsi, disposer de ces flux à un pas de temps fin, sans interruption grâce à la modélisation, permet de réaliser des bilans d'émission ou de dépôt de polluants sur de longues périodes.

Les bilans entre deux périodes données (entre un instant $t_{initiale}$ et t_{finale}) peuvent être établis selon l'intégration temporelle suivante :

$$Perte\ ou\ Emission\ totale = \int_{t_{initiale}}^{t_{finale}} F_X^{Total} . dt$$

Ces bilans peuvent aussi s'établir avec une distinction de chacune des voies d'échanges, c'est-à-dire ce qui vient du sol, de la voie stomatique ou cuticulaire.

$$Perte\ ou\ Emission_{sol\ ou\ stom\ ou\ cut} = \int_{t_{initiale}}^{t_{finale}} F_X^{sol\ ou\ stom\ ou\ cut} . dt$$

De tels bilans ont surtout été déployés pour les pertes azotées après application d'engrais ou pour estimer les pertes de pesticides par volatilisation, c'est moins courant pour le cumul du dépôt d'ozone.

Pour ce qui concerne les pertes azotées, en concordance avec les mesures de plusieurs expérimentations le modèle SurfAtm-NH3 a montré que les pertes provenaient majoritairement du sol ou de la litière que ce soit pour les écosystèmes forestiers (Hansen et al., 2017), une savane (Delon et al., 2019) ou les grandes cultures en climat tempéré (Personne et al., 2015, 2009), avec une réduction de l'émission d'ammoniac par les inhibiteurs d'urée après une fertilisation (Lichiheb et al., 2019) tandis qu'un dépôt sur les plantes est souvent piloté par les processus sur les cuticules (Hansen et al., 2017).

Pour les pertes totales vers l'atmosphère après l'application des pesticides, les bilans établis par des mesures de résidus de pesticides sur les feuilles ou par la modélisation, conformes aux ordres de grandeur compilés par Bedos et al. (2002), confirment que la modélisation de la volatilisation doit prendre en compte les processus entrant en compétition avec la volatilisation, c'est-à-dire la (photo)dégradation et la pénétration dans les feuilles (Lichiheb et al., 2014).

Les résultats originaux relatifs au dépôt d'ozone concernent l'inclusion du dépôt au niveau du sol notamment pour les cumuls sur une année entière, incluant donc la période hivernale souvent sans feuillage des agro ou écosystèmes. En effet, il est souvent mis en avant le rôle important des surfaces végétales, notamment leur absorption stomatique (Erismann et al., 2005) mais les incertitudes des autres surfaces sont toujours pointées du doigt (Erismann et al., 2005, Fowler et al., 2009, Ganzeveld et al., 2015 in Massad et Loubet 2015, ou encore très récemment Wu et al., 2018). A l'échelle d'une année entière sur une

parcelle agricole qui subit une succession d'assolements, incluant des périodes de sol nu non négligeables et des périodes où la couverture végétale est faible notamment au moment du semis et jusqu'à couverture du sol par le feuillage, nous avons mis en évidence que le dépôt au sol était prédominant avec une contribution à hauteur de 50 à 60% sur le dépôt total d'une année (Stella et al., 2013). Nous avons donc contribué à améliorer la période d'utilisation du modèle pour avoir une vue plus complète dans le temps du rôle des surfaces de biosphère.

ET SI L'ON FAISAIT DES MESURES POUR ESTIMER DES FLUX ?

Enjeux de la mesure d'ammoniac gazeux dans l'air

L'incertitude sur les émissions d'ammoniac demeure plus importante que pour la majorité des autres polluants majeurs et limite notre capacité à prédire les épisodes de pollution particulaire. Cette lacune sur les émissions d'ammoniac est essentiellement liée à la difficulté de mesurer les émissions d'ammoniac de façon précise, notamment parce que sa concentration gazeuse dans l'atmosphère est faible (quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$), parce que sa forme gazeuse s'adsorbe facilement sur les surfaces rendant ainsi son prélèvement pour analyse complexe. Une étude avait même remis en doute certains facteurs d'émissions liés aux épandages de lisiers en Europe (Sintermann et al., 2012). En conséquence, notre équipe s'est investie dans le développement de méthodes de mesure des flux plus fiables et plus précises pour être capable de mieux tenir compte du spectre des pratiques agricoles et de conditions pédo-climatiques des surfaces agricoles.

Deux méthodes ont été explorées pour permettre d'estimer les émissions d'ammoniac en conditions réelles. Un premier développement a été fait avec la mise au point du système ROSAA (Dépôt de Brevet - Personne et al 2011) tandis qu'un second développement simplifié a abouti en 2018 avec la mise au point des badges dits « conditionnels » (déclaration d'invention - Personne et al 2018a). Ces deux développements métrologiques pour la mesure des flux d'ammoniac sont tous deux fondés sur le gradient aérodynamique (Génermont and Cellier, 1997; Loubet et al., 2012a; Milford et al., 2009) inspiré de la théorie de la proportionnalité entre le flux et les gradients de concentration comme expliqué précédemment (**figure 1** et équations [1] et [2]).

Les deux développements se distinguent par l'objectif visé :

Le premier développement avait pour objectif de mettre au point un système capable de mesurer des flux d'ammoniac avec un pas de temps de prélèvement de 15 à 30 minutes et avec une précision élevée de mesure des concentrations. La mesure avec un tel pas de temps visait à comprendre la dynamique intra-journalière des émissions ou du dépôt d'ammoniac en utilisant les principes de la mesure d'ammoniac atmosphérique les plus fiables possible, c'est-à-dire à l'aide une analyse conductimétrique calibrée périodiquement comme en laboratoire.

Le second développement visait à mettre au point un système le plus simple possible, peu coûteux en utilisant des capteurs de concentration à diffusion passifs (dans nos études, des badges « ALPHA⁹ ») qui nécessitent une exposition à l'air ambiant sur de longues périodes (de quelques jours à plusieurs semaines). L'inconvénient de ces systèmes simples intégratifs est que l'exposition sur une longue période engendre une perte d'information sur la dynamique des flux (et que l'on sort des hypothèses d'application pour la méthode des gradients aérodynamiques précisés précédemment). Pour améliorer toutefois l'estimation des flux sur la période étudiée, j'ai proposé que l'exposition des badges soit conditionnée aux situations pendant lesquelles les flux sont censés être les plus forts et en évitant une exposition pendant les périodes de flux faibles. Plus exactement l'exposition des badges passifs est conditionnée à des situations microclimatiques déterminées préalablement. Ce développement a été motivé par le souci de permettre aux instituts techniques, aux collectivités et organismes de surveillance de la qualité de l'air de réaliser

⁹ ALPHA : Adapted Low Cost Passive High Absorption - Voir Tang et al., (2001) pour le détail technique des mesures par prélèvement dits passifs

des mesures de flux de manière autonome. Ce développement a abouti à la mise au point d'un système de mesure des flux par des « badges conditionnels ».

DEVELOPPEMENTS METROLOGIQUES POUR LA MESURE DES FLUX D'AMMONIAC ATMOSPHERIQUE – ROSAA

Dans une mesure par gradient vertical de concentration, le flux F est estimé comme le produit de la diffusivité turbulente K_c et du gradient vertical de concentration ; voir les premières pages de ce rapport.

Objectifs –
amélioration de
la mesure des
flux (plus précis)

Initiation par le
premier projet
Ammogri (2003)

Le système de mesure flux ROSAA (*Robust and Sensitive Ammonia Analyser*) est conçu selon un dispositif capable de réaliser des mesures de flux d'ammoniac (NH_3) dans des conditions d'émissions fortes ($> 1 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) et de dépôts faibles ($< 50 \text{ ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$), avec des concentrations ambiantes variant de moins 0.1 ou 0,2 $\mu\text{g m}^{-3} \text{NH}_3$ à plus de 100 $\mu\text{g m}^{-3} \text{NH}_3$. Le dispositif se fonde donc sur une mesure de concentration à plusieurs niveaux (au moins deux), au-dessus de la surface, dans un pas de temps compatible avec l'estimation de la diffusivité turbulente transposée en résistance et suffisamment sensibles et précises pour détecter des différences faibles de concentrations entre ces niveaux. La mesure du gradient vertical de concentration devra être accompagnée d'une mesure ou d'une estimation/modélisation de la vitesse de frottement souvent notée « u^* ».

Le principe de ROSAA (**figure 11**) est de coupler un prélèvement d'ammoniac gazeux (NH_{3g}) au moyen d'un denuder liquide (**figure 12**) lequel capte tout l'ammoniac gazeux dans l'air et le transforme en ammonium (NH_4^+) dans une solution dite piège pour ensuite analyser cette concentration d' NH_4^+ dans la solution par séparation sur membrane semi-perméable aux gaz. La technique d'analyse en solution est en effet fiable, robuste et bien maîtrisée. L'analyse de la concentration d' NH_4^+ se réalise par conductimétrie en référence à des concentrations-étalons.

Le système comprend :

- Plusieurs denuders de type WEDD (Wet Effluent DenuDer), chacun associé à deux réservoirs liquide et un débitmètre massique
- 1 boucle d'injection pour le séquençage de l'analyse des solutions
- 1 cellule d'analyse comprenant une membrane semi-perméable et une mesure par conductimétrie
- 4 solutions étalons d' NH_4^+ (typiquement 50, 100, 200 et 500 $\mu\text{g NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$, à adapter aux conditions de la mesure)
- Un circuit liquide comprenant des pompes péristaltiques et des électrovannes pour la circulation des différentes solutions, notamment la solution acide qui sert à piéger l' NH_3 .
- 1 balance pour déterminer la quantité de solution acide écoulée le long de chaque denuder
- l'automatisation du système. Les prélèvements sont intégrés sur 20 à 30 minutes.

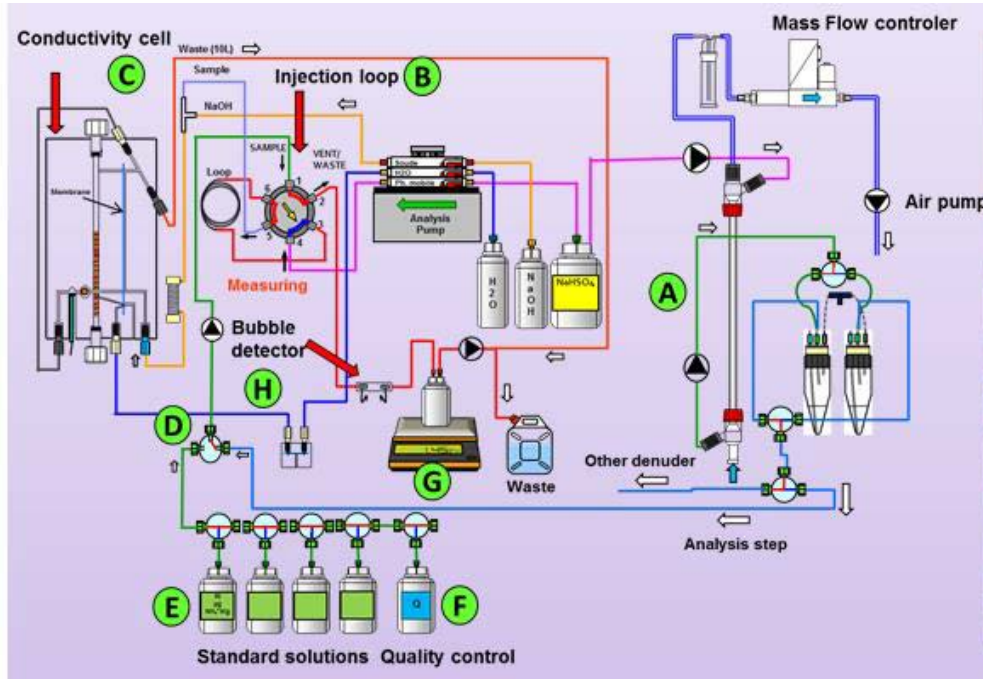


figure 11 : Schéma de l'analyseur ROSAA :

(A) trois à six denuders et leurs réservoirs positionnés en série, (B) boucle d'injection, (C) cellule d'analyse par séparation sur membrane et conductimétrie, (D) électrovanne permettant de sélectionner le flux à analyser, (E) solutions étalons, (F) balance pour mesurer la quantité de liquide contenu dans chaque réservoir et (G) détecteur de bulles.

La mise au point de cet analyseur a consisté *i-* à développer les denuders qui piègent l'ammoniac de l'air (NH_3) dans une solution acide (figure 12), *ii-* à concevoir les réservoirs qui permettent de stocker temporairement la solution de piégeage (et ainsi permettre un séquençage de l'analyse), et en parallèle assurer la mesure des quantités de liquide stockés dans ces réservoirs, *iii-* à coupler l'analyse d' NH_4^+ par des mesures de conductimétrie avec les réservoirs des denuders et la vanne d'injection et *iv-* enfin à mettre au point le circuit liquide et programmer les automatismes nécessaires pour séquencer les mesures réalisées sur chacun des denuders.

Dans le cas de l'ammoniac la phase liquide est un acide faiblement concentré qui permet d'assurer une efficacité de piégeage maximale pour ce composé. La partie centrale du denuder est dépolie pour assurer une répartition de la phase liquide la plus homogène possible le long de la paroi interne du tube. A la sortie du denuder, la concentration d' NH_3 dans l'air [NH_{3g}] s'exprime en fonction de la concentration en NH_4^+ [NH_4^+] dans la phase mobile par l'équation [24].

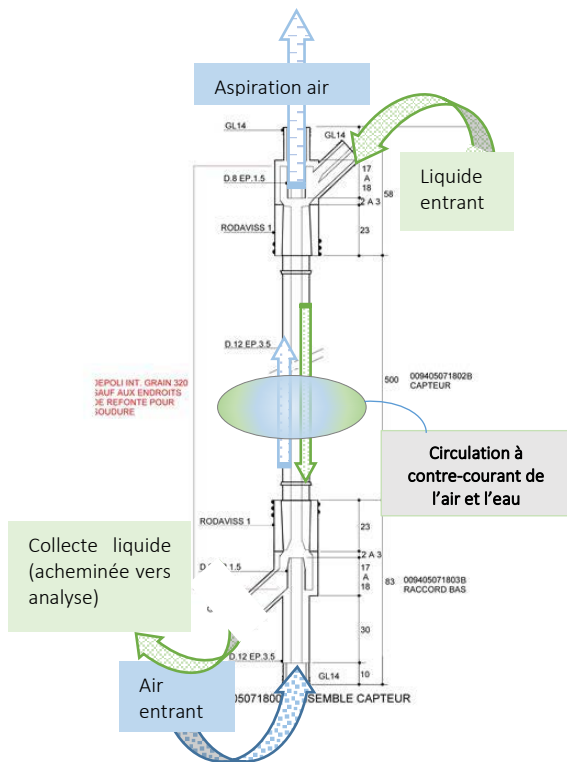


figure 12 : Schéma et principe du denuder.
Il s'agit d'un long tube de verre dépoli (sur sa partie interne) permettant l'introduction d'un liquide s'écoulant doucement le long de la paroi interne dépolie et collectée dans la partie basse, l'air est aspiré par la partie haute du tube permettant le contact en conditions laminaire entre l'air et l'eau.

$$[\text{NH}_{3g}]_{\mu\text{g}/\text{m}^3} = \frac{[\text{NH}_4^+]_{\mu\text{g}/\text{L}} \times D_{\text{acide}} \times m_{\text{L}} \cdot \text{min}}{D_{\text{air}} \cdot \text{L} \cdot \text{min} \times \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NH}_4^+}}} \quad [24]$$

où D_{air} et D_{acide} sont respectivement les débits d'air et d'acide circulant dans le denuder, tandis que M_{NH_3} et $M_{\text{NH}_4^+}$ sont respectivement les masses molaires de l'ammoniac et l'ammonium.



Ce développement est un travail d'équipe où plusieurs personnes ont mis en musique leurs compétences et idées. La coordination d'ensemble a été assurée par B. Loubet et moi.

La mise au point métrologique a été particulièrement chronophage du fait de toutes les difficultés techniques rencontrées à chaque étape. La principale difficulté technique a été de réaliser les parties d'adduction et de récupération de la solution acide.

Le système ROSAA dispose aujourd'hui de 6 denuders (6 voies de mesures) qui prélèvent en continu l'ammoniac atmosphérique. La **figure 13** illustre son installation en conditions réelles.

figure 13: Photo montrant un dispositif de mesure du gradient d' NH_3 à l'aide d'un analyseur à flux continu multi-canaux équipé de denuders liquides (ROSAA) (Loubet et al., 2012).

- Eléments de validation et sources d'incertitudes

La méthode du gradient aérodynamique pour les mesures de flux d'ammoniac a été validée par inter-comparaison avec d'autres dispositifs et montrant une erreur type de l'ordre de 20% pour les flux élevés et 33% pour des flux plus faibles (Milford et al., 2009). La méthode a également été comparé avec la méthode Relative Eddy Accumulation (REA) et la méthode de modélisation inverse (Loubet et al., 2012, 2010).

En conclusion, le système ROSAA a été utilisé sur plusieurs expérimentations (Loubet et al 2012 ; Ferrara et al., 2014 ; Personne et al 2015) et dans le cadre de projet pour des développements métrologiques nouveaux (voir le projet NUAGE¹⁰) et il a montré la fiabilité de ses mesures en comparaison d'autres systèmes. La figure ci-dessous illustre un exemple de comparaison entre systèmes, avec des badges ALPHA qui donne une valeur intégrée sur une longue période d'exposition (5 ou 12 heures) et un système d'analyse par chimie lumineuse (analyseur d'ammoniac CRDS [Cavity Ringdown spectrometer] / PICARRO G2103, Santa Clara, Californie, USA). La comparaison des concentrations mesurées par les trois systèmes est cohérente et les flux estimés par la méthode des gradients avec le système ROSAA et par méthode inverse (Loubet et al 2010) sont comparables (**figure 14**).

D'autres phases d'intercomparaison sont en cours en 2021 et 2022 avec une source d'ammoniac contrôlée et avec plusieurs dispositifs de mesures de l'ammoniac gazeux atmosphérique (projet AMICA¹¹).

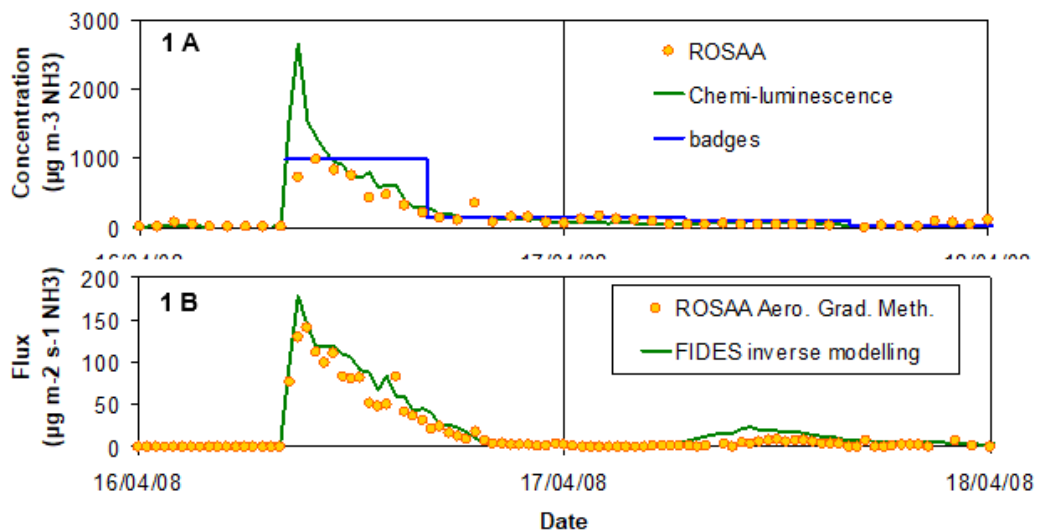


figure 14 : comparaison des mesures au champ des concentrations (A) et des flux (B) d' NH₃ estimés, avec l'analyseur ROSAA et une mesure par chimie-luminescence (appareil QCL – Quantum Cascade Laser) et par des badges ALPHA exposés à l'air ambiant durant 5 et 8h.

¹⁰ NUAGE : projet conjoint AAP ADEME CORTEA 2015 et PICRI région IdF 2015 ;

¹¹ AMICA : "Analyse Multi-Instrumentale des Concentrations d'Ammoniac (AMICA)", programme Inter-organisme LEFE-CHAT NH3IDF 2019/2020.

MISE AU POINT DE DISPOSITIFS SIMPLIFIES POUR UNE ESTIMATION AMELIOREE DES FLUX

Objectifs :
Simplifications
techniques de la
mesure des flux
Projet NUAGE

Les systèmes de « badges » sont couramment utilisés par des organismes de surveillance de la qualité de l'air ou par des instituts techniques pour évaluer les expositions sur des pas de temps longs. Toutefois, l'inconvénient de tels dispositifs est que l'exposition est temporellement intégrative et ces dispositifs simples sont utilisés pour détecter les expositions des personnes ou des surfaces à des concentrations à l'échelle de la journée, de la semaine ou du mois mais ils ne sont a priori pas adaptés pour estimer des flux.

Avec notre expérience méthodologique sur les mesures de gaz (notamment ammoniac), nous avons souhaité mettre au point un dispositif qui reste simple en concentrant les périodes d'exposition des badges aux périodes où les flux sont importants. Sachant que les flux d'émission ou de dépôt d'ammoniac dépendent fortement de la température et que les conditions de stabilité thermique de l'atmosphère réduisent les flux, il a été proposé un système « d'exposition conditionnel » des badges. En effet, un automatisme d'ouverture/fermeture des badges permet de choisir les périodes d'exposition en fonction des facteurs micrométéorologiques déterminés (**figure 15**). Au cours du projet que j'ai coordonné (projet NUAGE, voir ¹⁰) nous avons mis au point et testé le dispositif d'exposition conditionnelle dans une configuration avec un gradient vertical (**figure 16**) et nous avons testé différentes conditionnalités pour valider les précisions et l'intérêt des conditionnalités qui excluent certaines périodes d'exposition des badges.

La comparaison avec des dispositifs en continu (ROSAA notamment) nous a permis de conclure que les résultats obtenus par le système de badges conditionnels sont satisfaisants, avec une précision sur les flux intégrés d'environ 30%, ce qui est raisonnable pour l'ammoniac sachant l'imprécision élevée pour l'estimation des flux de ce gaz (Milford et al 2009).

Le dispositif mécanique est composé de deux lots de trois badges ALPHA, d'un couvercle, et d'un moteur

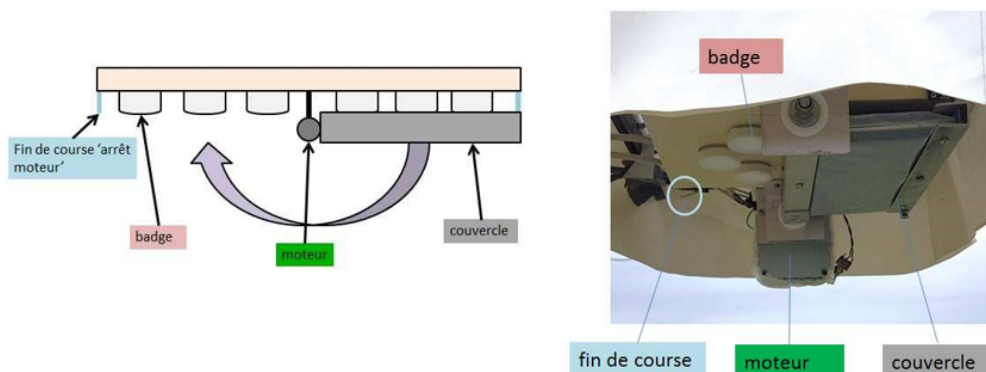
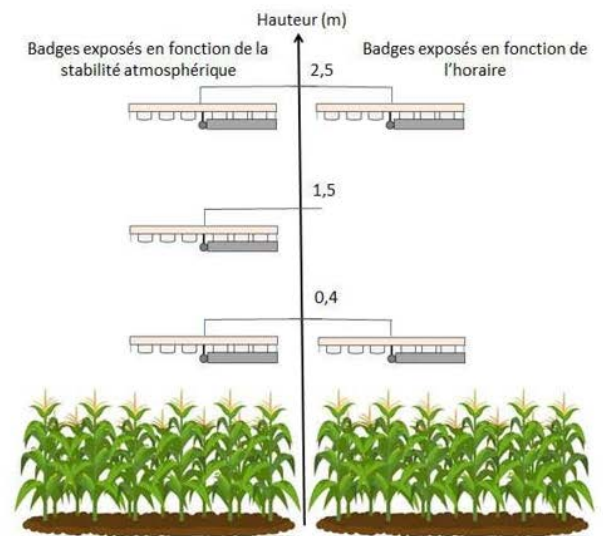


figure 15 : schéma et photo du fonctionnement d'un dispositif d'exposition conditionnelle des badges ALPHA.

A gauche, schéma de fonctionnement montrant que les badges côté gauche sont exposés à l'air ambiant tandis que ceux de droite ne sont pas exposés (couvercle fermé).



*figure 16 : illustration du système de badges avec une exposition à l'air ambiant conditionnée à des critères spécifiques.
Les badges sont positionnés à plusieurs hauteurs pour évaluer le différentiel entre chaque niveau. La photo et le schéma montrent une des expérimentations menées pour comparer les conditions d'exposition des badges (exposition en fonction de l'heure, le jour/nuit ou en fonction de la stabilité atmosphérique).*

Le calcul du flux sur la période d'exposition du système des « badges conditionnels » est donc toujours fondé sur le principe du gradient aérodynamique. Nous avons fait l'hypothèse que l'automatisme d'exclusion des expositions des badges pendant les périodes nocturnes (où les phases de stabilité thermique dans l'air sont souvent importantes) nous permettait d'utiliser le principe de la proportionnalité entre flux et gradient de concentration.

Pour notre nouveau système simplifié de badges conditionnels, toujours en cours d'amélioration et pour lequel nous continuons d'étudier les limites d'utilisation et les solutions d'amélioration de précision, nous avons comparé les résultats avec d'autres systèmes plus classiques (un COTAG voir Famulari et al., 2010 et un système « GLASS » _ Gradient-Lift Ammonia Sampling System utilisant le système de mesures Los Gatos Ammonia Analyzer). Le tableau ci-dessous montre la cohérence des résultats obtenus entre notre système « conditionnel » et les autres systèmes de mesure après un apport de lisier sur une parcelle agricole en 2017 (Site ICOS Grignon).

Ce qui est à noter, c'est surtout l'intérêt d'introduire une conditionnalité à l'exposition pour distinguer les phases de stabilité atmosphérique lesquelles introduisent une « pollution » des résultats sur les périodes peu intéressantes (périodes nocturnes et/ou stables, souvent avec des faibles flux) conduisant à une surestimation des pertes en comparaison des résultats obtenus par les autres systèmes.

L'ensemble des tests, des limites et les intercomparaisons est publié dans le rapport NUAGE (AAP ADEME CORTEA, PICRI région IdF 2015) que j'ai coordonné.

Tableau 2 : Cumul des pertes d'ammoniac dans l'air estimés par cinq systèmes de mesures de flux après un épandage de lisier le 21 mars 2017 sur le site ICOS à Grignon.

Estimation flux cumulé selon les méthodes de mesures	Emission période 22-26/03 (cumul 5j) (kg N/ha) (+/- écart-type)
Badges exposition continue	1.15 +/-0.31
Badges condition Jour + Badges conditions Nuit	0.93 +/-0.19
COTAG	0.44 +/-0.06
GLASS	0.82 +/-0.13
ROSAA	0.76 +/-0.25

L'encadré présente en cinq points les éléments nouveaux apportés à la communauté scientifique.

CE QUE MON ACTIVITE DE RECHERCHE A APORTE

- Une modélisation intégrée des échanges sol-plante-atmosphère pour l'énergie, l'eau, l'ammoniac, les pesticides et l'ozone – permettant un couplage entre le flux d'énergie et le flux de polluants
- L'inclusion d'une voie de dépôt stomatique au niveau des feuilles jaunes pour le dépôt d'ozone
- L'inclusion du devenir et du bilan des pesticides déposés sur les feuilles avec différentes voies de dissipation pour les pesticides) : la volatilisation des pesticides est fonction d'un réservoir de pesticides sur les feuilles après son application.
- Un dispositif de mesures précis (système ROSAA) au pas de temps semi-horaire pour les mesures de faibles flux d'ammoniac (émission ou dépôt)
- Un dispositif de mesures simplifié pour estimer des flux avec des moyens de mesures de concentration d'ammoniac du commerce

Partie 2
Transferts de connaissances
(pour et par la recherche)

Je ne veux pas passer sous silence mon activité d'enseignement et pas non plus la composante qui a visé à réfléchir aux productions de la recherche pour des usages en dehors des sphères académiques. J'ai en effet contribué à l'introduction de nouvelles thématiques dans les enseignements des ingénieurs et des universitaires, j'ai eu une démarche active pour que les productions de la recherche soient tournées vers la société. Cet ensemble d'actions met en résonance mes activités de recherche, d'enseignement et de transfert de la recherche à la société. Ce court chapitre est organisé en deux parties : la première explique comment mon activité de recherche a irrigué l'enseignement (§ *Transferts au travers l'enseignement ci-dessous*), la seconde récapitule le déploiement des activités de recherche « au-delà du laboratoire » (§ *Au service des utilisateurs* »)

TRANSFERTS AU TRAVERS L'ENSEIGNEMENT

Mon ambition est de développer des enseignements qui permettent aux étudiants (cycle ingénieur AgroParisTech et cycle universitaire) de se former sur des fondamentaux dans le domaine des échanges biosphère-atmosphère. En effet, ces fondamentaux apportent les concepts pour estimer les bilans d'énergie, de CO₂, de composés gazeux de la biosphère et donc de comprendre les interactions entre biosphère et atmosphère. Cet investissement est nécessaire pour **améliorer la capacité des étudiants à intervenir sur des sujets tels que les changements climatiques ou les besoins en eau des cultures et leur adaptation** (ainsi que celles des pratiques agricoles). Pour répondre à des attentes plus pointues dans le cadre des transitions énergétiques et agroécologiques, j'ai contribué à former les étudiants à l'application des fondamentaux physiques pour des questions précises en lien avec les impacts de la qualité de l'air sur le fonctionnement des couverts ou à l'évaluation d'aménagements (haies, bordures) de parcelles sur le bilan hydrique ou encore à l'évaluation du refroidissement des rues par la végétalisation dans un contexte d'étalement urbain.

INTRODUCTION DE NOUVEAUX THEMES D'ENSEIGNEMENT ET CREATION DE NOUVEAUX MODULES, EN LIEN AVEC LA RECHERCHE

Dans mon dossier de candidature pour le poste de maître de conférences en 1998, j'avais proposé la création d'un module portant sur la pollution atmosphérique et ses liens avec les agrosystèmes. Cet élément sur la pollution de l'air a été la première marche franchie dans le domaine de la pollution atmosphérique au sein d'AgroParisTech (à l'époque INA-PG), avant même que mes recherches n'abordent ces questions. Ce sont d'ailleurs les travaux de JF Castell sur les impacts de l'ozone sur les pertes agricoles en région parisienne par un étudiant en stage (Chauvin 1993¹² puis Castell and Lebard, 2003) qui m'ont « éveillé » à cette problématique. J'ai ensuite continué d'œuvrer pour la conception et la coordination de nouveaux éléments pédagogiques dans le domaine de la pollution atmosphérique et dans le domaine du microclimat ou du changement climatique (**Tableau 3** – colonne 1 en particulier). En parallèle et plus particulièrement ces dernières années, j'ai investi dans la création d'enseignement non-thématiques pour que les étudiants renforcent leurs compétences de manière concrète sur les outils de la recherche (**Tableau 3** – colonne 2 en particulier).

Depuis cette première initiative de création d'un module sur la pollution atmosphérique (48h) dès mon arrivée et qui faisait l'originalité de mon dossier de candidature au poste de

¹² Chauvin, M., 1994. La pollution atmosphérique par l'ozone et ses conséquences sur les rendements agricoles en Ile de France. Rapport étudiant. INA PG - AIRPARIF. Paris: 58 pages

maitre de conférences, j'ai pu construire plusieurs autres éléments de formation, i/ bien évidemment pour apporter des fondamentaux ou des connaissances scientifiques en lien avec mes compétences scientifiques et par mes recherches connectées aux questions sociétales, ii/ sur les outils pour faire de la recherche (module « recherche documentaires et scientifiques » en M1 puis déployé aussi pour les apprentis 1A du cycle ingénieur AgroParisTech, et enfin iii/ pour donner des compétences techniques permettant aux étudiants de se plonger dans la modélisation mécaniste (par exemple le module « numerical modelling » dont l'objectif est de donner les fondamentaux pour modéliser et pour mettre en situation les étudiants de créer un modèle en partant d'articles scientifiques). Le **Tableau 3** (colonne 2) précise les deux derniers points qui sont focalisés sur « les outils pour ou par la recherche ».

D'autre part, j'ai tenté d'innover sur le plan pédagogique en expérimentant des méthodes pédagogiques. Par exemple, un des modules que j'ai créés avec mon collègue Benoit Gabrielle (« Ecology under climate change », destiné à des étudiants de master) est fondé sur la création de cours « par les étudiants eux-même » et « pour eux-mêmes », en écho avec les approches formatives de pédagogie inversée qui se développent. Avec le besoin de former les étudiants à de futurs métiers, j'ai demandé à de petits groupes d'étudiants de concevoir des cours pour leurs camarades sur des sujets nouveaux (mais à traiter de manière relativement simple, proche d'un niveau licence L3). Les étudiants devaient donc s'immerger dans les fondamentaux thématiques à acquérir et faire acquérir. Ils s'impliquaient pour améliorer leurs propres connaissances, échanger, dialoguer entre eux et ensuite passer à la phase de transmission à leurs camarades. Cette démarche visait à i/ les rendre autonomes pour apprendre des fondamentaux et ii/ les exercer à être pédagogues pour transmettre clairement des connaissances. Cette démarche est née du fait que certains étudiants pourraient ou voulaient devenir enseignants ou enseignants-chercheurs.

Tableau 3 : Ensemble des séquences de formation créées.

<u>Séquences de formation disciplinaire</u>	<u>Séquence de formation sur les outils de/pour la recherche</u>
Pollutions atmosphériques <i>(cycle ingénieur 2^{ème} année)</i> 3 ECTS	Cycle de conférences Grandes Questions Environnementales niveau M1 Graduate School Biosphera 3 ECTS
Pollutions atmosphériques et écosystèmes <i>(M1 AETPF)</i> 3 ECTS	Modelling concepts and applications M2 CLUES 4 ECTS
L'atmosphère : outils et méthodes pour étudier ses mouvements et ses interactions avec la surface <i>(cycle ingénieur 2^{ème} année)</i> 3 ECTS	Recherche bibliographique et documentaire pour une question scientifique <i>(M1 AETPF)</i> 6 ECTS
Gérer l'eau : problématiques régionales et planétaires <i>(cycle ingénieur 2^{ème} année)</i> 3 ECTS	Formalisme scientifique <i>(cycle ingénieur 1^{ère} année apprentis)</i> 3 ECTS
Enjeux et défis Thèmes : 1- Changements climatiques 2- L'eau dans le monde <i>(cycle ingénieur 1^{ère} année)</i> 3 ECTS	« Penser pour enseigner » – Tools for the internships <i>(module destiné aux étudiants en thèse)</i> <i>mise en situation et tutorat</i> 2 ECTS
L'arbre, de sa biologie à sa place dans l'espace rural <i>(cycle ingénieur 2^{ème} année)</i> 3 ECTS	
Cycles et ressources, Applications aux cas des ENR <i>(M1 AETPF)</i> 3 ECTS	
Maitrise de l'eau dans le champ cultivé <i>(cycle ingénieur 1^{ère} année)</i> 3 ECTS	
Processus physiques de l'environnement continental <i>(M1 AETPF)</i> 3 ECTS	
Le continuum Sol-Plante-Atmosphère – <i>module de Licence UPMC –</i> <i>Physique appliquée aux sciences de la vie</i> 3 ECTS	
Biogeochemical cycles and surface-atmosphere exchanges and interactions: global scale M2 CLUES 4 ECTS	
Biosphere-Atmosphere interactions at local scale M2 CLUES 3 ECTS	
Ecology under climate change M2 CLUES 3 ECTS	

CONCEPTION D'UN PARCOURS DE MASTER - LE M2 CLUES

Avec le soutien de mes collègues (B. Gabrielle S. et Saint-Jean) et de l'équipe pédagogique du DEA « fonctionnement de la biosphère », j'ai initié en 2014 la création du M2 Climate, Land Use and Ecosystem Services (CLUES). Nous avons pu construire ce nouveau M2 dans un contexte propice aux évolutions des masters lors de la période de création de l'université Paris-Saclay. Les marqueurs de ce M2 sont i/ une proportion importante d'étudiants internationaux dans le recrutement, la langue d'enseignement (anglais), les stages et les emplois visés (renforcement vers les ONGs, organismes internationaux, ministères, ...), ii/ un enseignement sur les problématiques du dérèglement climatique et des changements globaux en interactions avec les usages des surfaces et enfin iii/ une mutualisation forte avec d'autres formations traitant du climat, des sols ou des productions alimentaires (plusieurs modules sont partagés entre M2 de l'Université Paris-Saclay et d'autres établissements – Université Paris-Sorbonne et Polytechnique). Ce parcours est identifié au sein de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) qui regroupe les forces de recherche franciliennes dans le domaine des sciences du climat.

Ce M2 est désormais un terrain favorable pour déployer des enseignements très en lien avec les activités de recherche de l'UMR ECOSYS et de l'IPSL, notamment dans le domaine des échanges biosphère-atmosphère (énergie, eau et polluants). Avec l'aide de mes collègues, j'ai pu mettre en place trois modules disciplinaires (Biosphere-Atmosphere Interactions at local scale ; Biogeochemical cycles and surface-atmosphere exchanges and interactions : global scale ; Ecology under climate change) et deux sur les outils de la recherche et recherche appliquée (Modelling concepts and applications ; Integrative Project).

MENTION AETPF, AVEC DES LIENS TISSES ENTRE TOUTES LES DISCIPLINES

Depuis l'initiative d'AgroParisTech de porter son propre cycle master à partir de 2009, j'ai coordonné la création du niveau M1 puis l'ensemble de la mention « Espaces-Ressources-Milieus » et les six M2 qui lui étaient adossés. Le fil conducteur du contenu pédagogique du M1 a été de mettre en œuvre des enseignements qui croisaient les disciplines dans le domaine de l'environnement (sciences biologiques et écologiques, sciences physiques appliquées à l'environnement, sciences du sol, du paysage et sciences sociales). Il s'agissait de former de « vrais » généralistes sur l'environnement et de constituer un socle scientifique commun partagé par tous les étudiants pour qu'ensuite, ces derniers se spécialisent au niveau M2 dans les domaines qui les intéressaient le plus.

Par la suite, sur la période 2014-2016, l'établissement AgroParisTech s'est inscrit dans l'intégration de ses masters au sein de l'Université Paris-Saclay. Le paysage des appellations nationales des masters et l'inscription du master porté par AgroParisTech dans l'université Paris-Saclay a nécessité une reconfiguration de la formation master. La mention « Espaces, Ressources, Milieus » est devenue la mention « Agrosociétés, Environnement, Territoires, Paysages, Forêt » (AETPF). J'ai donc instruit toute l'évolution regroupant i/ l'adaptation des formations dans le paysage national « AETPF » avec une réflexion sur des parcours intégrés « parcours M1 + M2 », ii/ l'adaptation des formations au sein de l'établissement Université Paris-Saclay, iii/ la constitution du dossier d'accréditation de la mention AETPF pour le ministère de l'enseignement supérieur, ainsi que les évaluations HCERES des mentions ERM puis AETPF depuis 2009.

Aujourd'hui, je continue de coordonner la mention AETPF avec toujours le souci de constituer un socle solide porté par le niveau M1, fondé sur une approche intégrative et multidisciplinaire des questions d'environnement.

AU SERVICE DES UTILISATEURS

Conscient de l'importance de transférer les productions scientifiques à la société, que ce soit par le biais de l'enseignement théorique et de la manipulation concrète des outils ou en réfléchissant avec les (potentiels) utilisateurs, j'ai travaillé à ce sujet dans plusieurs directions. Dans la direction la plus proche des sphères académiques, en coordonnant un axe de travail de l'institut CLand sur les liens « Recherche-Enseignement » et en amplifiant la diffusion des outils créés (diffusion libre du modèle SurfAtm et des dispositifs de mesure).

COORDINATION DU GRADUATE PROGRAM DE L'INSTITUT CLAND

J'ai intégré le comité exécutif de l'institut CLand en 2019 et j'assume la tâche de coordonner le volet « Graduate Program » de cet Institut de Convergence.

En quelques mots, l'institut CLand vise à soutenir les recherches sur les solutions de gestion, d'usage et d'organisation des terres pour gérer les transitions écologiques et énergétiques du 21ème siècle. L'axe « Graduate Program » vise à transférer ces connaissances aux étudiants.

Pour la partie « Graduate Program », depuis 2019, nous avons mis en place une plateforme de e-learning avec plus de 45 vidéos traitant des questions sur les changements climatiques et ses liens avec les transitions agro-écologique et la production alimentaire. Cette plateforme est structurée en trois parties : 1- les fondamentaux physiques et biologiques pour comprendre les interactions climat-surface, 2- les outils pour la recherche et 3- les plus récentes connaissances produites dans le domaine de CLand.

J'ai insisté pour que les doctorants et les post-doctorants contribuent aux contenus, notamment avec l'objectif que ces derniers acquièrent de l'expérience en enseignement, notamment dans les nouvelles formes pédagogiques et nous mettons en œuvre des formations internes pour ceci (journées jeunes chercheurs par exemple).

D'autre part, le module « Integrative Project » du M2 CLUES, encadré par l'équipe pédagogique du M2, est conçu depuis 2019 avec le soutien du Graduate Program pour faire travailler les étudiants sur des questions relatives à la transition agroécologique et sur la mise en œuvre concrète de solutions par le biais d'un « projet » (restitué à toute la communauté CLand). Sans rentrer dans le détail, les compétences visées sont l'acquisition des connaissances les plus récentes sur des sujets très pointus en lien avec les thématiques CLand. Les chercheurs des unités de recherche (LSCE, ECOSYS, MIA, Agronomie) sont mis à contribution dans le tutorat du projet, qui a une dimension scientifique forte mais qui a aussi une dimension appliquée et souvent territorialisée.

Trois éléments de mes activités de recherche ont conduit à des « produits » utilisables librement.

- Le modèle SurfAtm est désormais une marque déposée, codé en deux langages de programmation (C et fortran) et sous licence libre. L'article scientifique fondateur date de 2009 (Personne et al., 2009) et sa diffusion est en cours sous différentes formes (déclaration d'invention 2018, Stella et al., 2022 en cours). Par ailleurs, en plus des éléments scientifiques, un environnement logiciel facilitant son utilisation a été créé, dès la conception du modèle en 2003 (Personne et Loubet, 2003).

Une interface a été réfléchiée pour un usage du modèle par un utilisateur sans connaissance en programmation. L'interface « homme-machine » est sous un environnement *Java* qui facilite son usage où des « boutons » permettent de choisir les configurations essentielles et le lancement et la visualisation automatique des résultats.

Plusieurs TD d'étudiants ont été conçus avec cet outil (SurfAtm+Interface) en appui aux concepts théoriques du bilan d'énergie, des déterminants sensibles pour la consommation en eau des couverts, de la température des feuilles et du sol ou du dépôt et de l'émission de polluants depuis des couverts. Le modèle dans sa version scientifique « simplifiée », accompagné de son interface, est encore utilisé chaque année en TD dans divers modules.

- Le système ROSAA a fait l'objet d'un dépôt de brevet pour consolider les éléments de conception du dispositif global et permettre une diffusion aux équipes de recherche dans le domaine des flux d'azote réactif dans l'atmosphère. Cette démarche visait à protéger les concepts de l'automatisation et de l'enchaînement des séquences de captation et d'analyse de l'ammoniac dans l'air, tout en permettant la transmission de notre expérience aux collègues ou à des compagnies privées désireuses de développer le système de mesure.

Cette démarche est longue, fastidieuse (avec une dimension juridique forte) mais elle a apporté à l'équipe une riche expérience de protection des inventions avec l'objectif *in fine* de transmettre le dispositif dans le domaine privé et avec la possibilité de le commercialiser.

- Les autres déclarations d'invention (dispositif des badges conditionnels et capteur microclimatique actionneur radio-pilotable) sont les premières étapes pour la diffusion libre des résultats de recherches appliquées. Lorsque la recherche relève d'une dimension théorique prépondérante, la diffusion passe par la rédaction d'articles scientifiques originaux, en général destinés à la communauté scientifique. Lorsqu'il s'agit de développements météorologiques ou de recherches appliquées, destinées à un usage partagé, la première phase permettant la diffusion libre est la protection de l'invention. J'ai instruit la phase de conception (identification des besoins, résolution des problèmes techniques) des deux dispositifs « badges conditionnels » et « capteur microclimatique actionneur », ainsi que les déclarations d'invention associées. A ce stade, il reste à aller au bout du processus pour franchir l'étape vers la commercialisation qui relève d'autres services (et *a priori* du domaine privé).

Partie 3

Perspectives et Projet

Les travaux présentés dans la première partie de ce document ont montré qu'il était possible de développer une démarche générique permettant de simuler les flux de polluants gazeux entre la biosphère et l'atmosphère, en gardant une approche commune pour l'ozone, les pesticides ou l'ammoniac, en adaptant la paramétrisation du modèle aux différents gaz. Par ailleurs, le modèle SurfAtm permet une modélisation distinguant les caractéristiques du sol et celles de la végétation. Il est donc tentant d'étendre notre démarche à d'autres composés gazeux, notamment les composés organiques volatils (COV) et à des surfaces cultivées présentant un degré de complexité plus importants que celles rencontrées en grande culture, telles que les surfaces en vigne enherbées par exemple.

D'autre part, les outils que j'ai développés ces dernières années sont adaptés à l'échelle de la parcelle, alors que les questions relatives aux enjeux de pollution atmosphérique sont le plus souvent en lien avec des échelles spatiales dépassant largement ce cadre, entraînant un défi récurrent sur le changement d'échelle spatiale et sur l'intégration de l'hétérogénéité (Bou-Zeid et al., 2020). En fait, le travail présenté précédemment peut être vu comme la conception d'une « brique élémentaire » permettant une quantification précise des flux sur une « unité homogène ». Cependant, la quantification des flux sur des échelles spatiales plus étendues impose d'assembler et de juxtaposer plusieurs unités homogènes. Un territoire, qu'il soit urbain, périurbain ou rural, est en effet constitué d'une mosaïque d'unités aux caractéristiques diverses et il importe d'aborder cette échelle car c'est à ce niveau que l'on peut mieux comprendre puis évaluer le rôle de la biosphère sur le micro ou le méso-climat et sur la qualité de l'air. De plus, c'est en intégrant cette dimension territoriale que l'on pourra proposer, en s'appuyant sur la modélisation spatiale, des aménagements adaptés pour réduire l'îlot de chaleur urbain, diminuer les émissions de polluants à l'échelle régionale ou évaluer les expositions des populations.

Le projet proposé est composé de deux grands axes qui découlent chacun des considérations précédentes.

1/ Le premier axe reste centré sur l'échelle de la parcelle, mais il s'agit d'élargir le champ d'investigation pour produire des connaissances ou des outils i/ sur des espaces plus complexes que les parcelles type « grandes cultures » et ii/ sur des échanges d'autres composés gazeux, notamment les composés organiques volatils (COV) au sujet desquels les connaissances restent partielles, en raison des difficultés de mesure et de modélisation. Parmi les surfaces ciblées moins bien défrichées en termes d'échanges biosphère-atmosphère, les cultures en rang comme les vignes et les surfaces agricoles « humides » comme les rizières, dont l'importance agronomiques est majeure ou alors les mangroves ou marais, dont l'importance écologique est forte, sont des surfaces à mieux étudier en termes d'échanges (énergie, eau et polluants atmosphériques). Le choix de travailler sur les composés organiques volatils répond à la volonté de soutenir l'investissement de mon équipe de ces vingt dernières années dans le champ de la recherche sur la pollution atmosphérique et de la contribution des surfaces naturelles à cette pollution.

2/ Le second axe, prolonge une évolution récente de mes travaux et entend traiter la question de la dispersion des polluants à l'échelle spatiale des territoires, en incluant les espaces artificialisés (les villes et leur périphérie). Pour cela, le principe général est de coupler ou d'utiliser les connaissances actuelles à l'échelle de la parcelle dans des approches spatiales étendues (paysage ou région) en incluant notamment les espaces artificialisées et partiellement végétalisés. J'ai démarré dans cette voie, à travers mon implication dans le domaine des effets de la végétalisation sur la qualité de l'air des canyons

urbains (échelle du quartier). En effet, un quartier représente une surface hétérogène, dont il faut représenter à la fois l'effet de la végétation et celui du bâti.

Le tableau ci-après (**Tableau 4**) représente le croisement entre les deux dimensions du projet (échelles en colonne et objets en ligne). Les cases au fond jaune foncé correspondent aux travaux passés, à travers en particulier l'encadrement de quatre thèses soutenues ; celles sur fond jaune clair sur les travaux démarrés, travaux dont le développement fait partie du projet. Les cases au fond bleu correspondent aux travaux à peine démarrés (cases au fond bleu foncé, thèse de M. Ernst qui vient de débiter) et à entreprendre dans le cadre du projet (cases bleu clair).

Tableau 4 : Synthèse de mes activités de recherche dans le domaine des échanges biosphère-atmosphère pour différents types d'éco ou agrosystèmes et pour différents composés. Croisement entre surfaces étudiées et type d'échange (polluants-énergie).

En jaune foncé, les éléments abordés au cours des vingt dernières années (adaptation SurfAtm et/ou mesures) et en jaune pâle les éléments peu abordés ou en cours. En couleur bleutée, l'évolution engagée (bleu foncé) ou envisagée (bleu clair).

Objets étudiés	Echelle parcelle + hypothèse d'homogénéité				Spatialisation + prise en compte hétérogénéité	
	Grandes cultures	Forêts	Vignes	Zones humides	Espaces artificialisés + végétalisation	Mosaïque paysagère /Transect Ville-Campagne
Microclimat			SM ¹³		SLM ¹⁴	ME
NH ₃	FT ¹⁵	KH ¹⁶		Coll. IIRR, CEH ¹⁷		
Pesticides	NL ¹⁸		YC ¹⁹			
O ₃	PS ²⁰	Vulnoz ²¹			SLM, ME ²²	ME
COV						

¹³ S Maouchi (stage de M2, 2018)

¹⁴ S. Le Mentec (thèse en cours, soutenance prévue en avril ou mai 2022)

¹⁵ F. Tardy (stage de M2 2014)

¹⁶ K Hansen (thèse 2015)

¹⁷ Collaborations depuis 2019 sur les rizières (IIRR, India et CEH, UK)

¹⁸ N. Lichiheb (thèse 2015)

¹⁹ Y. Capoglu (stage de M2 2019)

²⁰ P. Stella (thèse 2011)

²¹ VulnOz (projet recherche ANR 08-ANR-VULN-0012)

²² M. Ernst (thèse en cours, fin en nov. 2024)

Vision d'ensemble du projet de recherche

**** Axe 1 - Adaptation de la modélisation à des éco ou agrosystèmes plus complexes.**

Enjeu général = prendre en compte de nouveaux agro ou écosystèmes et d'autres composés dans l'air

- Adaptation de SurfAtm aux parcelles de vignes (question des pesticides dans l'air)
 - Enjeu = émission Pesticides des zones fortement émettrices
 - Difficultés et challenges = hétérogénéité des parcelles de vigne
- Adaptation de SurfAtm aux milieux humides (questions de l' NH₃ sur le dépôt et l'émission des rizières + question des pesticides et de l'NH₃ pour les zones humides)
 - Enjeu 1 = émission spécifique des rizières ; que se passe-t-il après l'inondation et l'apport d'engrais
 - Enjeu 2 = dégradation des milieux naturels (riches en biodiversité notamment)
 - Difficultés et challenges = prise en compte des surfaces d'eau libre et de leur assèchement, voire des cycles de marées pour les marais salants et mangroves, surfaces peu explorées et instrumentées.
- Adaptation de SurfAtm aux COV
 - Enjeu = contribution des agro et écosystèmes à la pollution photochimique
 - Difficultés et challenges = complexité chimique et liens à introduire avec le fonctionnement biochimique des couverts (inclusion des processus au niveau des feuilles et au niveau des systèmes racinaires avec le fonctionnement du sol) et liens à envisager avec modèles de chimie atmosphérique ou établissement d'abaques

**** Axe 2 - Vers des études des espaces urbains et périurbains et vers des travaux de spatialisation**

Enjeu général = évaluer les liens réciproques entre l'occupation, les usages des surfaces (et leurs changements) et les impacts sur le climat régional, la qualité de l'air.

- Etudes et modélisation des canyons urbains
 - Enjeu « technique » de disposer d'outils (flux d'énergie et de polluants) simples intégrant surfaces artificialisées et végétalisation
 - Enjeu scientifique et sociétal = s'intéresser à des milieux complexes avec une connexion forte avec la santé publique, la problématique du dérèglement climatique et la conception urbaine (réduction des îlots de chaleur urbains mais aussi les économies d'énergie ou la qualité de l'air).
 - Difficultés et challenges = couplage de modèles 1D et 2D et connexions avec les sphères scientifiques dans les domaines de la santé publique, de la surveillance qualité de l'air et de l'urbanisme.
- Intégration des connaissances (modèles) dans des modèles spatialisés (modèle de chimie-transport ou de climat à méso échelle)
 - Enjeu 1 = intégrer les surfaces complexes (croiser les interactions énergie-polluants sur des surfaces mixtes « artificialisées » et « naturelles ») dans les modèles spatialisés = disposer d'outils de modélisation locaux [échelle du quartier] et régionaux [échelle paysage ou méso-échelle] pour évaluer les effets de politiques de végétalisation (sur la qualité de l'air, sur l'atténuation des îlots de chaleur urbains, ...) et les effets de l'étalement urbain sur le climat régional.
 - Enjeux 2 = évaluer les modifications urbaines et périurbaines (étalement urbain ou végétalisation) en termes d'impacts agronomiques (qu'est-ce que des planifications massives de végétalisation urbaines induiraient sur les productions agricoles et forestières périphériques, notamment dans le contexte des changements climatiques).
 - Difficultés et challenges = maîtrise des outils de spatialisation (travaux à mener en collaboration) et intégration à mener - répondre à des questions en lien avec les changements globaux.

AXE 1 : RECHERCHES DANS LA CONTINUITE DES TRAVAUX ACTUELS A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

DEPLOIEMENT DE L'APPROCHE RESISTIVE POUR DES ECO OU AGROSYSTEMES COMPLEXES (VIGNES, RIZIERES)



Travaux en
cours
Echelle
Parcelle

L'objet de mes travaux précédents portait majoritairement sur les grandes cultures, représentées par un couvert homogène, couvrant totalement la surface du sol, ce qui est tout à fait adapté à la description du fonctionnement microclimatique de ces situations, une fois les premiers stades du développement dépassés. De nombreuses autres productions végétales ne peuvent être représentées simplement par cette approche « couvert homogène ». Il s'agit notamment des cultures maraîchères, des productions fruitières ou de la vigne, ainsi que les grandes cultures aux premiers stades de la croissance, lorsque le feuillage n'est pas totalement couvrant.

Maraîchage, vergers et vignes s'ils ne représentent qu'un peu plus de 5% des surfaces agricoles (source AGRESTE, statistiques agricoles 2018) sont très consommateurs de produits phytosanitaires (près de 25% du volume des pesticides appliqué en France métropolitaine est réalisé sur ces surfaces) et ils sont souvent à proximité des zones urbaines. Leurs rôles en terme microclimatique (rafraîchissement du fait d'une végétalisation en milieu urbain ou en périphérie des villes) et en termes d'émission/dispersion de composés polluants ou de dépôt et de dépollution commencent à être étudiés sous l'angle de leurs services écosystémiques (service de régulation du climat et de la qualité de l'air).

Sur ce volet de la modélisation de surfaces hétérogènes, je travaille avec ma collègue C. Bedos sur l'adaptation du schéma d'échange biosphère-atmosphère pour les vignes (stages de M2 S. Maouchi 2019²³ et Y Capoglu 2020²⁴). Les enjeux sont majeurs pour la pollution de l'air du fait de la volatilisation des pesticides et de la conséquence sur la santé globale (« one health »). De plus, les politiques publiques nous questionnent sur les distances d'épandage de pesticides entre les parcelles agricoles et les habitations.

Pour répondre à ces questions de volatilisation à partir des parcelles en vigne, il est nécessaire de tenir compte de leur particularité : ce sont des cultures en rang, souvent sur des terrains en pente et avec une couverture au sol mélangeant des surfaces de sol nu et des surfaces parfois enherbées. La photo (**figure 17 a/**) illustre un exemple de vigne enherbée, montrant le type d'hétérogénéité rencontré, qui est caractérisée aussi par une régularité de l'occupation de la surface.



Vignes

²³ S. Maouchi 2018, Stage de M2, Modélisation du bilan d'énergie de cultures annuelles (vigne) : Evaluation d'un modèle simplifié.

²⁴ Y. Capoglu - 2019, Stage de M2, Testing of a pesticide volatilisation model applied to a vineyard.

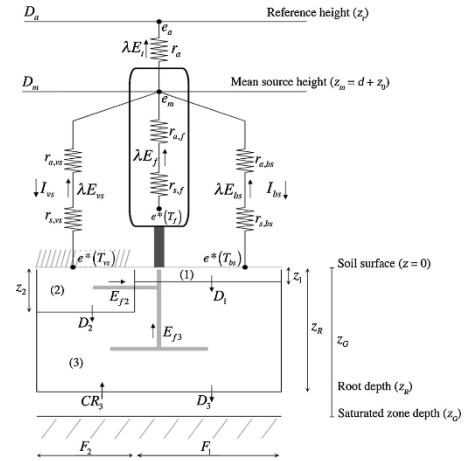


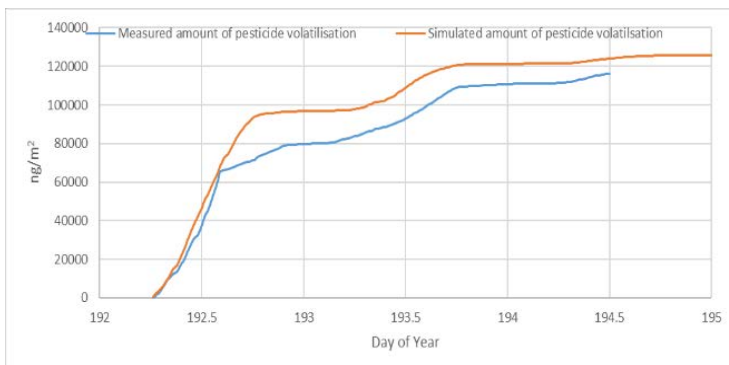
figure 17 : Système hétérogène « Vigne »
(a/ photo et b/ schéma résistif proposé).

a/ illustration d'une parcelle de vigne avec les rangs de vignes en sol nu et l'inter-rang enherbé. b/ représentation sous forme de schéma résistif d'un rang et inter-rang et des échanges verticaux au niveau de chacune de ces unités.

Le challenge scientifique pour modéliser une telle parcelle est de savoir prendre en compte les deux couverts végétaux différents (la surface enherbée et la surface végétale du pied de vigne) tout en distinguant aussi la surface de sol nu sur le rang. Sur le plan microclimatique, le transfert vertical pour la chaleur, la vapeur d'eau et les composés gazeux dans l'air dépendra des échanges 1/ dans le rang, au travers du feuillage de la vigne et 2/ dans l'inter-rang, entre la surface très proche du sol et le sommet du couvert dans son ensemble.

Le travail mené avec C. Bedos, inspiré des travaux de Montes et al., 2014 et en collaboration avec le LISAH²⁵ a permis de construire un modèle résistif en tenant compte de la spécificité des cultures en rang. La figure 17b/ en présente le principe, combinant simultanément les échanges verticaux du rang et de l'inter-rang, en tenant compte dans ces échanges du sol nu, de la surface enherbée et des pieds de vigne.

L'objectif étant de s'intéresser en priorité à la volatilisation des pesticides dans les vignes, les principes de couplage entre l'énergie, la chaleur et l'eau sont similaires aux éléments présentés précédemment, tandis que le couplage avec les émissions de pesticides est inspiré des travaux de Lichiheb et al. (2014 et 2016).



	Measurement	Simulation
Total volatilisation (kg/ha)	116.10 ⁻⁵	126.10⁻⁵
Volatilisation rate(%)	7.7%	8.4%
Initial application dose is 15.10⁻³ kg/ha		

figure 18 : Comparaison des mesures et de la simulation pour les flux cumulés de pesticides après application de 15g/ha de Cyflufinamide sur une parcelle de vigne.

a/comparaison modèle vs mesures pour la dynamique de la perte cumulée de pesticide dans l'air. b/tableau de synthèse des pertes cumulée par volatilisation, mesurée et modélisée.

²⁵ LISAH : UMR Laboratoire d'Etude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème. Tutelle INRAe-IRD-Institut Agro-AgroParisTech

Les premiers résultats de modélisation sont encourageants pour le fongicide appliqué (Cyflufenamide) en comparaison de mesures faites sur une parcelle viticole dans l'Hérault (Pouzolles, France) en juillet 2019 (Capoglu Y., 2020²⁴).

Ce travail s'intègre dans le projet collaboratif « MIPP » porté par l'INRAe (Voltz et al., 2019) qui vise à concevoir un modèle intégré fondé sur un « multicouplage » de modèles (hydrologique, eau, sol, air) pour estimer conjointement le devenir des pesticides dans l'air, le sol, les eaux à l'échelle d'un bassin versant, en tenant compte des pratiques agricoles et des modifications de l'usage des sols (projet RIPP-VITI – dans le cadre du programme ECOPHYTO). Ce travail sur la volatilisation des pesticides depuis une parcelle de vigne (enherbée ou non) est donc une première étape vers l'évaluation des pertes de pesticides à l'échelle du bassin versant. De plus, C. Bedos et R. Teysseire (doctorante ECOSYS-CHU Bordeaux) utilisent désormais le modèle d'émission pour évaluer l'exposition des riverains des parcelles viticoles aux pesticides (Teysseire et al., 2020).

Toujours en me fondant sur le déploiement de l'approche résistive pour caractériser les échanges entre des surfaces entre biosphère et atmosphère, je suis en train d'adapter le modèle SurfAtm aux échanges des zones humides avec l'atmosphère, tout particulièrement pour traiter de la question des émissions d'ammoniac par les rizières. Si la production de riz en France occupe une surface mineure (environ 14.000 ha sur 13 millions d'ha de grande culture), dans le monde le riz représente un peu plus de 25% des surfaces de grandes cultures, proche du maïs et dépassant l'orge. Sachant les cultures de riz souvent déficitaires en azote, il y a souvent des apports massifs d'azote de synthèse (urée) sur ces cultures, avec un risque d'émission d'ammoniac sur de très grandes surfaces, qui est encore mal connu (Van Damme et al., 2018). De plus, le cycle inondation-assèchement avec un apport de fertilisant azoté en période inondée reste peu étudié sur le plan des émissions.

Nos premiers travaux ont donc porté sur la mesure des émissions d'ammoniac (**figure 19**, (Twigg et al., 2019)) et la comparaison des instruments de mesure en milieu « hostile » (température dépassant les 30°C, humidité relative de l'air 90%). Une collaboration démarre avec l'IIRR²⁶ et le CEH²⁷ pour passer à l'étape d'évaluation quantitative par la mesure et surtout la modélisation des émissions dans ce contexte.

La méthode envisagée pour la modélisation est d'utiliser le modèle SurfAtm-NH₃ en incluant une composante de surface « eau libre ». Les processus physico-chimiques dans l'eau sont connus (avec une forme aqueuse prédominante de l'ammonium d'où la faible émission d'NH₃ gazeux en zone inondée) et il s'agira d'intégrer l'évolution de la surface inondée vers une surface progressivement asséchée dont l'azote réduit (NH_{3aq}) pourra plus facilement passer sous forme gazeuse. Un couplage avec un modèle biogéochimique pourrait être envisagé pour tenir compte du devenir des différentes formes d'azote mais ce sera dans un second temps.

Le challenge scientifique relatif à ce travail est de bien représenter la dynamique de transition entre la période inondée et la phase de sol sec, en incluant l'évolution des formes de l'azote.



Rizières

²⁶ IIRR : Indian Institute of Rice Research, Inde

²⁷ CEH : UK Centre for Ecology and Hydrology, Lancaster, UK.



figure 19: Photo de l'installation du système ROSAA sur le site indien (à Cuttack) dans une rizière.

ADAPTATION A L'ETUDE DES EMISSIONS DE COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS

Un autre pan du travail à l'échelle de la parcelle sera mené en étudiant les questions relatives aux émissions des composés organiques volatils par les agro et écosystèmes systèmes. Les composés organiques volatils regroupent une multitude de substances, qui peuvent être d'origine biogénique (naturelle) ou anthropique (humaine). Dans l'atmosphère, les composés organiques volatils (COV) se dégradent et contribuent à perturber les équilibres chimiques avec notamment pour conséquence, la formation et l'accumulation d'ozone ambiant et ils contribuent de manière indirecte à l'effet de serre additionnel. L'enjeu scientifique est de comprendre les rétroactions entre le fonctionnement des couverts et celui de l'atmosphère en termes d'émission de COV, fonctionnement lui-même influencé par les changements climatiques (Steiner, 2020 ; He et al., 2021).

L'UMR ECOSYS dispose de compétences désormais reconnues dans ce domaine avec une maîtrise d'instruments de mesure des concentrations très sensibles pour une très large gamme de composés (plateforme ANAAE PTR-MS, faits marquants INRAe UMR ECOSYS, 2019). C'est un réel atout pour étudier la contribution des agro et des écosystèmes à la pollution photochimique et à la formation des aérosols secondaires que les COV influencent. Aujourd'hui, la pollution diffuse des surfaces biogénique continue d'être mal connue, notamment pour les COV du fait de l'hétérogénéité, de la diversité des surfaces et des interactions entre le fonctionnement des plantes et ses échanges gazeux avec l'atmosphère.

Travaux à envisager

Echelle Parcelle

Dans ce registre, le modèle SurfAtm me semble adapté à ces études pour l'émission des surfaces biogéniques car il permet de proposer un couplage tenant compte de la température des surfaces (sol et feuillage). C'est en effet important d'utiliser un modèle couplé énergie-polluant dans ce cas précis car le déterminant climatique principal pour l'émission des plantes est la température des feuilles (Guenther et al., 1991).

Le challenge scientifique sera aussi d'intégrer la complexité et la diversité chimique des COV émis par les couverts. Inspiré des travaux de modélisation de Guenther et al. (1993) qui établissent que les émissions de COV sont température-dépendantes, le modèle SurfAtm permettra de déterminer les températures des surfaces des feuilles mais il pourra aussi préciser la température du sol et apporter les compléments sur le rôle du sol dans ces émissions, ce qui est particulièrement mal connu (Tang et al., 2019).

Sachant toutefois que les COV présentent une forte réactivité avec de nombreux composés dans l'air, des collaborations avec les laboratoires du LISA²⁸ et du CERE²⁹, spécialistes de la modélisation de la pollution atmosphérique en Ile de France, seront à envisager pour intégrer les processus de transformation des composés gazeux au cours de leur transfert depuis les surfaces, notamment dès que l'on passe de l'échelle locale à une échelle régionale. Le travail à l'échelle de la parcelle est l'une des briques pour mieux comprendre et prédire la pollution atmosphérique ; c'est la mosaïque des briques qui permet d'avoir une vision plus globale et pertinente à l'échelle de la région.

La démarche visant à aborder ces questions de pollution atmosphérique à l'échelle territoriale en intégrant l'organisation spatiale et sa mosaïque hétérogène caractérise la transition de mes activités, que j'opère depuis quelques années et que je développe dans ce projet.

²⁸ LISA : Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques

²⁹ CERE : Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique

AXE 2 : VERS L'ETUDE DES ESPACES URBAINS ET PERIURBAINS ET VERS DES TRAVAUX DE SPATIALISATION POUR EVALUER LES LIENS ENTRE USAGES DES SURFACES ET IMPACTS SUR LE CLIMAT REGIONAL EN TERMES DE QUALITE DE L'AIR

Vers un élargissement des échelles

Echelle Paysage et régionale

La transition que j'ai opérée depuis 2014 pour aborder les questions microclimatiques et de pollution atmosphériques à de plus larges échelles s'accompagne d'une orientation vers les questions posées par les espaces urbains et périurbains. Cette orientation se justifie i/ par la part croissante de la population urbaine (aux dépens de la population rurale) à l'échelle nationale (INSEE 2020("Toujours plus d'habitants dans les unités urbaines - Insee Focus - 210," n.d.)) ou internationale (World Urbanization Prospects - United Nations et al., 2019), ii/ par les besoins de « plus de nature en ville » des citadins des métropoles denses (voir par exemple Priego et al. (2008) ou Pincetl (2012)), iii/ par la volonté de rapprocher, voire d'intégrer et de partager les lieux de production alimentaire et les lieux de consommation (Davies and Evans, 2019).

Les sociétés de plus en plus urbaines, qui recherchent une plus grande imbrication des milieux urbains avec les espaces naturels dans des villes qui se densifient et/ou qui s'étalent, souffrent dans le même temps, compte tenu du dérèglement climatique, d'un accroissement de la fréquence et de l'intensité des périodes caniculaires. Ces épisodes sont accentués par le phénomène d'îlot de chaleur urbain, conséquence de la concentration des surfaces artificielles et des sources de chaleur (chauffage/climatiseurs et voitures notamment) (Oke, 1973 ; KIM, 1992). Dans ce contexte, introduire plus de végétation en ville et en périphérie est souvent mis en avant comme une solution d'atténuation de l'îlot de chaleur, et cela répond au désir de rapprochement culturel entre ville et nature ou encore représente une opportunité pour rapprocher les zones de production et de consommation alimentaire.

Ce contexte justifie l'orientation prise pour inclure la composante urbaine et l'artificialisation des surfaces dans les travaux de recherche de l'équipe Eco&Phy dans l'UMR ECOSYS.

Je propose de développer deux volets complémentaires de recherche, l'un relève directement de travaux à l'échelle de quartiers urbains végétalisés, initiés et soutenus par mon collègue P. Stella (MC AgroParisTech) tandis que l'autre volet s'oriente vers de plus larges échelles pour comprendre et évaluer les impacts de l'occupation des sols à l'échelle des territoires, donc d'aborder un peu plus les questions d'organisation de l'espace et de modification des usages des surfaces sous l'angle des changements climatiques et de la pollution atmosphérique.

Sur le premier volet, concrètement, il s'agit de mettre au point un outil pour décrire le microclimat à l'échelle du quartier en incluant la végétalisation des surfaces artificialisées. Les éléments du bilan d'énergie (avec les sorties classiques : température des surfaces, flux de chaleur et de vapeur) permettront de traiter des questions de confort thermique pour les populations urbaines avec ses conséquences sur les années de vie perdue DALY³⁰ (ou en bonne santé EVCI³¹) dans le contexte des canicules exacerbées par les dérèglements climatiques. D'autre part, notre expertise dans le domaine de l'émission et du dépôt de polluants atmosphériques permettront de contribuer aux recherches sur la pollution de

³⁰ DALY : Disability Adjusted Life Years – indice du nombre d'année perdues en raison d'une mauvaise santé

³¹ EVCI : Espérance de Vie Corrigée de l'Incapacité - Espérance de vie soustraite du nombre d'années perdues du fait de maladie ou de handicap.

l'air à l'échelle des quartiers, en incluant le rôle de la végétation sur cette qualité de l'air. Ces aspects pourront se faire en collaboration avec les laboratoires qui travaillent sur les villes (par exemple le Lab Recherche Environnement Vinci/ParisTech) ou encore avec les AASQA³² telles qu'Airparif. Ces recherches, aux finalités très appliquées et connectées aux questions sociétales de santé et d'aménagements se destinent aux urbanistes, aux aménageurs, aux responsables de la mise en place de politiques publiques pour la ville.

Sur le second volet qui vise à traiter plus largement de l'organisation de l'espace (du territoire à la région), il devient important d'avoir une approche spatiale étendue au paysage ou la région pour comprendre les interactions entre chaque élément constituant la mosaïque étudiée. S'impliquer dans des recherches qui permettent d'étudier l'organisation de l'espace en incluant le transect entre les espaces urbains et les espaces ruraux, devient un enjeu pour avoir une vision plus systémique et pour évaluer plus globalement les effets et les impacts des modifications des usages et des occupations des surfaces urbaines, agricoles et naturelles. Ce second volet nécessite le déploiement de travaux d'intégration des connaissances pour imbriquer la variété des espaces configurant une petite région, en incluant donc ces espaces urbains. La composante « énergie », avec ses résultantes température et îlot de chaleur, reste un élément central mais il est aussi intéressant d'aborder cette méso-échelle sous l'angle des pollutions atmosphériques, qu'elles soient d'origine urbaine avec des conséquences sur les espaces contigus à ces surfaces (impacts sur les écosystèmes ou agrosystèmes en périphérie des villes) ou bien qu'elles soient d'origine agricole avec la dispersion atmosphérique des pesticides ou autres polluants gazeux en direction des villes sous le vent de la zone d'émission par exemple.

Les propositions d'orientation de recherche pour ces axes sont précisées dans les deux derniers paragraphes ci-dessous.

ETUDES ET MODELISATION DES CANYONS URBAINS

Plusieurs modèles ont été développés pour simuler les échanges énergétiques entre les zones bâties et l'atmosphère afin de quantifier l'impact de l'urbanisation sur le microclimat, ainsi que les bénéfices de la végétalisation urbaine ou des surfaces en eau libre (Lin et al., 2010 ; Fahmy and Sharples, 2009 ; Lobaccaro et al., 2019). Globalement, ils peuvent être classés en deux catégories : les modèles à haute résolution basés sur la dynamique des fluides (par exemple, Solene Microclimate de l'UMR CRENEAU de Nantes (Bouyer, 2009; Musy et al., 2015) ou ENVI-met (Bruse and Fleer, 1998) d'un bureau d'études spécialisé et les modèles de « canyon urbain » basés sur l'analogie d'Ohm pour les transferts de masse et d'énergie (par exemple, le modèle BEP-BEM de Salamanca et al., (2010) ou le modèle TEB de Masson, 2000). Les premiers permettent une résolution tridimensionnelle très détaillée mais nécessitent des calculs longs et une description très fine et précise en trois dimensions de la zone étudiée, tandis que les seconds ne donnent que la température moyenne de la rue mais permettent une grande quantité de simulations en raison de leur faible temps de calcul et ils sont réputés plus faciles d'utilisation et de paramétrisation.

Les travaux engagés ont démarré avec le modèle TEB (Town Energy Balance) qui est un modèle de canyon urbain initialement développé au CNRM de Météo-France. Les bilans d'énergie des trois surfaces route, toit et mur sont représentées selon une approche résistive que nous maîtrisons bien. Dans sa version initiale, TEB n'identifie qu'une seule température de surface pour représenter les zones végétalisées. Les échanges avec la végétation urbaine sont modélisés au moyen d'un couplage avec le modèle ISBA

³² AASQA : Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air

(Interaction entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère) qui décrit les échanges de chaleur et d'eau le long du continuum sol-plante-atmosphère, initialement développé pour les écosystèmes naturels (Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996). Les travaux de Calvet et al (1998) ont introduit l'assimilation du CO₂ comme un des déterminants de l'ouverture stomatique, avec la possibilité de tenir compte alors de la croissance des plantes et du changement de la concentration ambiante en CO₂ avec le changement climatique. Plus récemment, le modèle TEB a inclus une schématisation simplifiée d'une rangée d'arbres au sein de ce canyon (Redon et al., 2020).

Sachant l'intérêt à bien représenter la complexité d'un canyon urbain, représentatif d'un quartier relativement homogène, incluant une proportion de végétalisation variable selon les quartiers, sur les toits ou non, P. Stella et moi collaborons avec le CNRM et l'équipe d'agriculture urbaine de l'UMR SADAPT pour intégrer le modèle SurfAtm dans le modèle TEB afin d'intégrer les déterminants des échanges du sol de ceux de la végétation dans ces canyons. La représentation des échanges d'énergie a été faite récemment (Le Mentec et al., 2022) mais l'objectif est d'aller au-delà des questions microclimatiques « pures » (énergie, température) et de voir les effets de la végétation des toits ou des zones piétonnes sur les pollutions atmosphériques des quartiers.

Les premiers travaux ont en effet démarré en 2019 avec la co-direction d'une thèse (S. Le Mentec 2019 ; Autorisation à Diriger des Recherches/ADR obtenue auprès de l'Université Paris-Saclay en 2019 pour cette thèse) et avec le soutien de P. Stella en tant qu'encadrant sur le sujet de la modélisation des échanges d'énergie et d'ozone dans un canyon urbain végétalisé.

Les éléments de construction du modèle couplé sont présentés ci-dessous (**figure 20**). Les flux de chaleur, de vapeur et de polluants depuis les surfaces végétalisées sont représentés en vert et sont issus du formalisme de SurfAtm. Cette approche permet ainsi de représenter l'ensemble des échanges au niveau de la route et au niveau des toitures en tenant compte de leur végétalisation. Le canyon urbain est décrit par sa morphologie et les caractéristiques des échanges thermique du bâti (température de consigne à l'intérieur des bâtiments, épaisseur et isolation des murs) et par les proportions de surface végétale sur les toits et les routes ainsi que la paramétrisation du couvert (surface foliaire, hauteur du couvert et type de plante).

Microclimat urbain
Problématique des îlots de chaleur urbains

R_{ar} , R_{ag} , R_{aR} , R_{agr} , R_{aw} , R_{bl} , R_{sgr} , R_{sye} , R_{cut} , R_{ac} , R_{bs} , R_{soil} désignent respectivement les résistances aérodynamiques de la route, du jardin, du toit, du toit vert, du mur, la résistance de la couche limite de feuille, les résistances stomatiques des feuilles vertes et des feuilles jaunes, la résistance cuticulaire, la résistance aérodynamique du couvert, la résistance de la couche limite du sol et la résistance du sol.

e , q , q_{sat} , T , H , LE , G désignent la pression partielle de la vapeur d'eau, l'humidité spécifique, l'humidité à saturation, la température, les flux de chaleur sensible et latente et le flux conducteur.

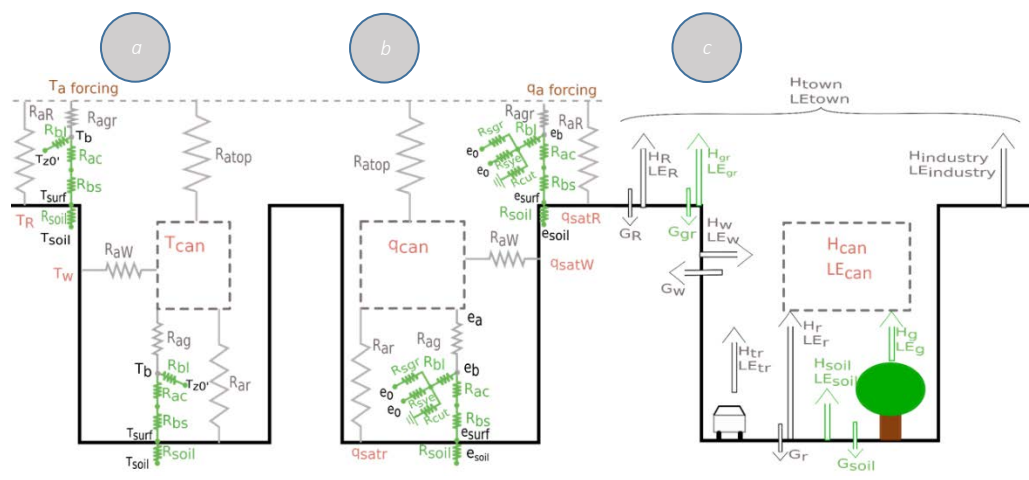


figure 20 : représentation du modèle couplé TEB-Surfatm pour : a) la chaleur, b) la vapeur d'eau, et c) les échanges d'énergie.

Les éléments des schémas représentés en vert désignent ce qui relève du modèle SurfAtm tandis que la couleur grise désigne les éléments issus du modèle TEB. Les éléments en rouge désignent les grandeurs de sortie du couplage TEB-SurfAtm au sein du canyon urbain.

Microclimat urbain

Problématique de la pollution des rues au sein des quartiers

Les premiers résultats obtenus avec le modèle TEB-SurfAtm sont testés avec une expérimentation menée à Strasbourg (**figure 21**). Ils confirment la bonne adéquation des sorties du modèle pour les termes du bilan d'énergie avec les mesures réalisées sur site (**figure 22**) pendant une année entière (Le Mentec et al., 2022).

Le challenge est désormais d'intégrer les paramétrisations des interactions des polluants avec le bâti et les surfaces artificielles (les murs, le bitume, les toits etc...). Cette adaptation aux échanges de polluants nécessite une intégration des connaissances issues de travaux sur les processus chimiques au niveau des surfaces inertes.

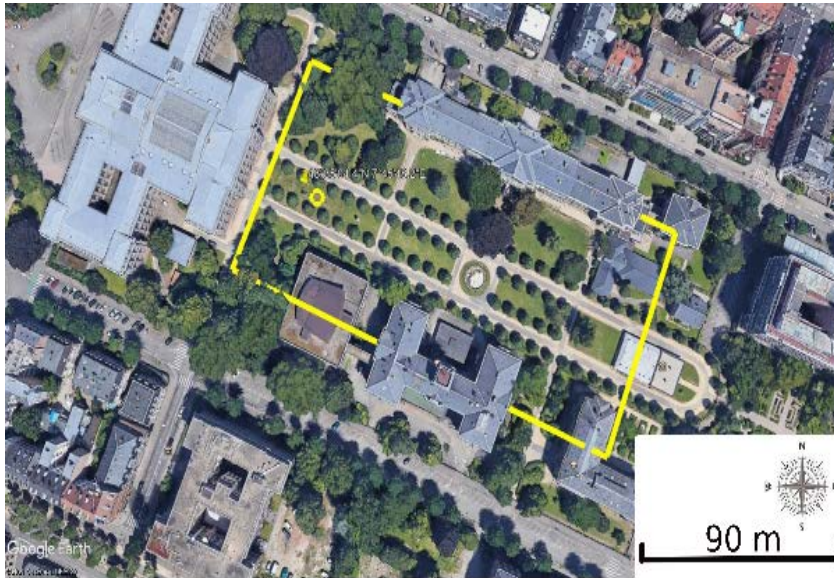


figure 21 : photo aérienne de la zone d'étude. Jardin du Palais universitaire à Strasbourg. Le rond jaune dans le cadre jaune identifie le mât de mesure. Le cadre jaune représente la zone sur laquelle plusieurs mesures de surface (débit de sève, surface foliaire, etc...) ont été réalisées et les caractéristiques morphologiques du quartier sont basés sur les éléments de ce cadre.

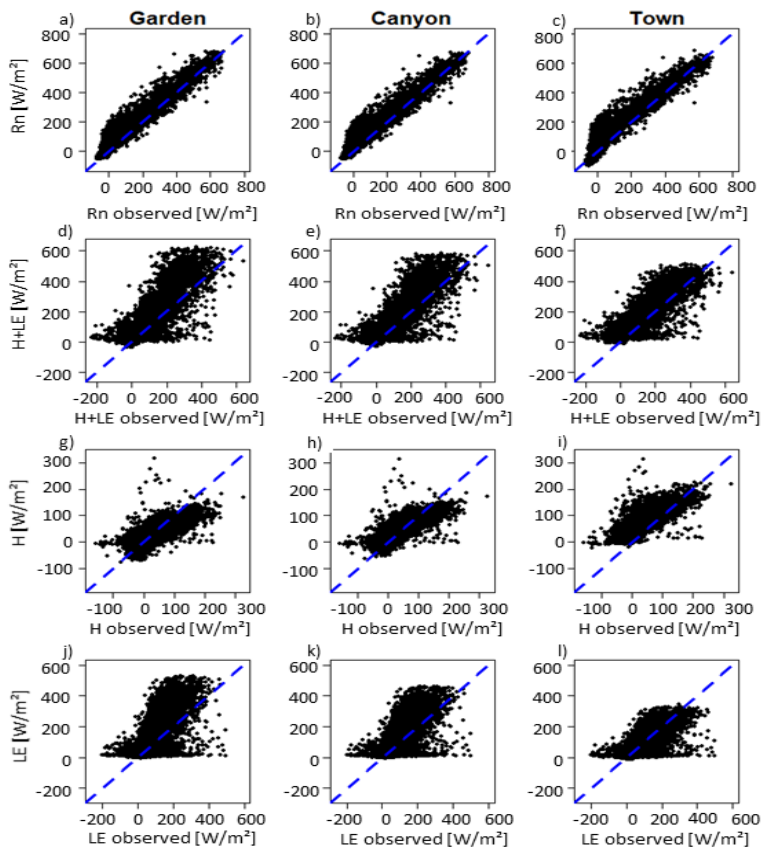


figure 22 : comparaison des mesures et des simulations sur une année de mesures en 2016. (a-c) rayonnement net (Rn), (d-f) flux convectifs (H+LE), (g-i) flux de chaleur sensible (H), (j-l) flux de chaleur latente (LE) à l'échelle de la route (première colonne) du canyon (seconde colonne) et de la ville en dernière colonne.

INTEGRATION DES CONNAISSANCES DANS DES MODELES SPATIALISES

Les problématiques générales abordées dans ce volet touchent à l'organisation, l'occupation des surfaces et le changement de leur usage au sein du transect ville-campagne et les impacts environnementaux associés. Les travaux que je démarre visent à traiter des interactions entre ville et campagne et à s'intéresser à la périphérie des villes. Cet axe de recherche répond à de nombreux enjeux : de la lutte contre l'augmentation de l'amplitude thermique et d'extension spatiale de l'îlot de chaleur urbain à la dégradation de la qualité de l'air en passant par les conséquences agronomiques ou écologiques de cet îlot de chaleur ou de pollution atmosphérique ou par l'adaptation, voire les solutions d'atténuation de cet îlot (de chaleur ou de pollution).

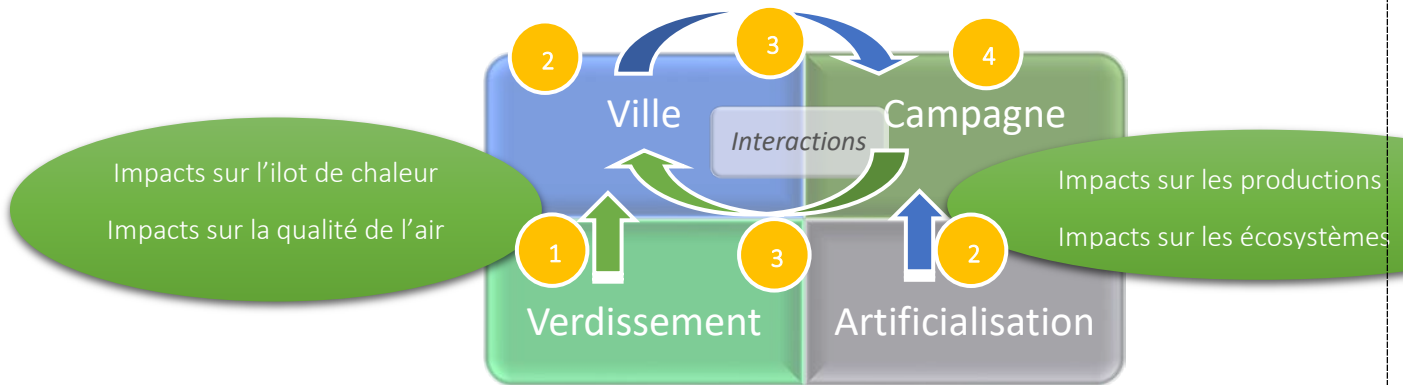


figure 23 : schéma des interactions biophysiques que j'envisage d'aborder, combinées aux enjeux sous l'angle des impacts. L'échelle d'espace traitée est celle du paysage ou de la région en incluant les espaces urbains, avec l'objectif de coupler les processus d'échange biosphère-atmosphère pour l'énergie et les polluants.

La numérotation suggère l'ordre des étapes sur le moyen terme pour aborder la diversité des enjeux dans le transect ville-campagne.

L'objectif n'est pas de répondre à toutes les questions scientifiques et sociétales mais d'améliorer les outils de modélisation qui permettront de répondre à certaines d'entre elles. A cette fin, la démarche d'ensemble (**figure 23**) démarre par la constitution de la « brique élémentaire » qui décrit les échanges à l'échelle du quartier (§ précédent, ① sur la figure ci-dessus). Les étapes ② et ③ agrègent les quartiers et intègrent leurs représentations dans un modèle de méso-climat et de chimie-transport pour modéliser le déplacement des masses d'air au sein du territoire étudié. L'étape ④ concernerait des travaux sur les conséquences agronomiques et écologiques sur les espaces naturels et agricoles.

Pour ce travail, il s'agit d'intégrer les connaissances à l'échelle de l'unité homogène et d'utiliser les outils déjà développés par les communautés scientifiques du climat et de la météorologie.

L'étape ① est décrite au paragraphe précédent. En revanche, pour ce qui concerne l'étape ② qui représente *i/* la diversité des quartiers (lesquels sont plus ou moins végétalisés) et *ii/* les espaces périurbains (avec une dominance majeure des surfaces naturelles et agricoles mais avec des zones ponctuelles artificialisés), le projet d'intégration est fondé sur la représentation de plusieurs quartiers ayant chacun leurs caractéristiques

Organisation de l'espace

Impact des changements d'occupation des surfaces sur le microclimat et la qualité de l'air des villes

propres au sein de la ville (hauteurs, largeurs des bâtiments, isolations, taux de végétalisation, ...). Le travail envisagé est illustré sur la **figure 24** avec une vision d'ensemble de la petite région qui est structurée autour d'une mosaïque d'unités homogènes constituant un paysage hétérogène allant de la ville dense à sa périphérie plus agricole et naturelle.

Concrètement, la représentation de la mosaïque des surfaces inclut les mécanismes des échanges biosphère-atmosphère (énergie, eau, polluants) pour chacune de ces unités surfaciques. L'étape ③ demande l'intégration de la mosaïque urbaine et sa périphérie au sein d'un modèle atmosphérique de méso-échelle (type Meso-NH³³, WRF³⁴, RAMS³⁵) pour modéliser la dynamique atmosphérique dans la région étudiée. Pour son extension aux questions de pollutions atmosphériques, le modèle CHIMERE³⁶ est vraisemblablement le bon candidat-modèle car il est adapté à l'échelle régionale et prend en compte les processus de chimie atmosphérique.

Sous l'angle urbain, l'originalité et la spécificité de ce travail se situera sur l'intégration des effets de la végétalisation en ville (effets dans la ville et sa périphérie). Ce travail démarre avec la thèse de M. Ernst³⁷ (nov. 2021 – cofinancement Institut CLand/Ingérop³⁸) que je co-encadre avec P. Stella et B. Loubet comme directeur de thèse (UMR ECOSYS). Son premier axe de travail traite l'étape ② pour avoir d'abord une base de modélisation des processus d'échanges intégrée à l'échelle de la ville. A moyen terme, il s'agira de passer au point ③ pour élargir les échelles et se donner les moyens d'investir les questions biophysiques sur les interactions ville-campagne.

Sous l'angle périurbain voire rural, avec une spatialisation du climat à l'échelle régionale, on pourra aborder des questions agronomiques en traitant de l'impact de la proximité de la ville sur les productions agronomiques ou forestières de cette périphérie des villes. On peut imaginer évaluer a posteriori ou en prospective les réductions de la production des agrosystèmes du fait d'épisodes de pollution à l'ozone ou les impacts positifs ou négatifs de l'augmentation de la température en proximité des villes pour les cultures ou les forêts, voire recommander des adaptations de telle ou telle culture ou prédire le potentiel développement de maladies des plantes. Ceci décrit le point ④ de la représentation de la **figure 24**.

En résumé, la priorité de cet axe de travail se focalise sur les solutions de couplage entre les modèles de bilan d'énergie et d'échanges de polluant pour les couverts et les surfaces artificialisées, et les modèles de transport atmosphérique à l'échelle du paysage ou régional.

En complément du travail de modélisation, il est actuellement envisagé de mettre au point les méthodologies de mesure validant les modèles de surface dans ce cadre d'études à dimension régionale. Nous étudions depuis un an les solutions pour installer des capteurs micrométéorologiques en ville, sur des bâtiments avec un contraste de végétalisation de l'espace urbain et en s'éloignant progressivement du centre des villes.

Organisation
de l'espace

Impact de la ville sur le
climat
régional et
la qualité de
l'air au sein
et à la
périphérie
des villes

³³ Meso-NH : <http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh55>

³⁴ WRF : <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

³⁵ RAMS : <https://rams.atmos.colostate.edu/>

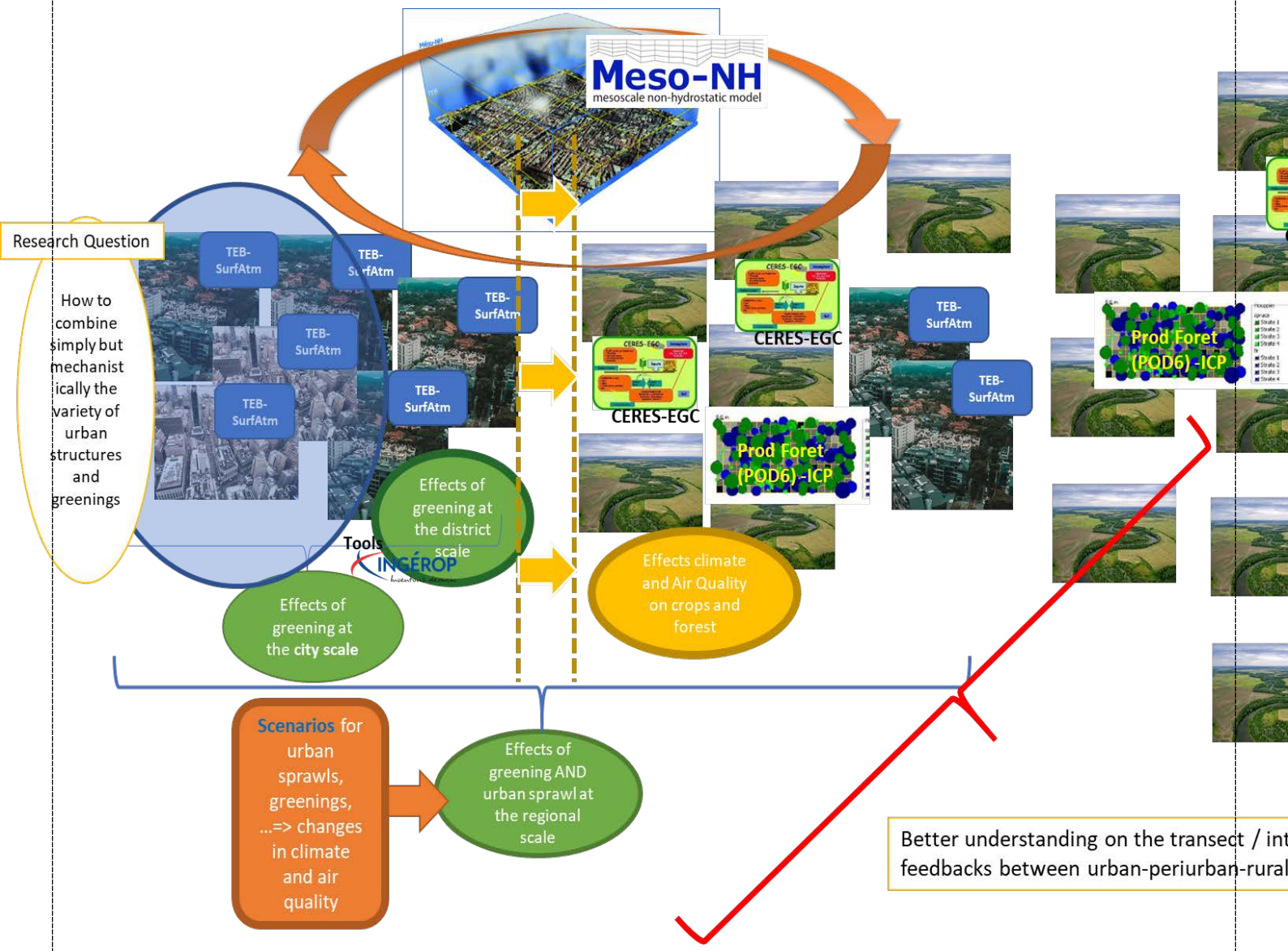
³⁶ CHIMERE : <https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>

³⁷ M. Ernst démarrage en novembre 2021 sur «Impact of urbanization and urban greening on climate and air quality »

³⁸ Ingerop : Bureau d'Ingénierie d'Etudes Techniques – France.

Sur ce dernier volet, je suis impliqué dans des projets pour des mesures des flux (énergie, eau et polluants atmosphériques) à l'échelle du quartier en proposant des instrumentations dans des contextes de quartiers variablement végétalisés. Sur cette partie expérimentale, nous nous appuyons sur le projet européen PAUL³⁹ récemment accordé qui vise à observer sur le long terme la contribution des villes et leur périphérie aux gaz à effet de serre. C'est une opportunité que nous avons saisie dans l'équipe pour élargir notre échelle de travail à l'instar de l'évolution que je propose. Notre spécificité relève de notre expertise de l'interface sol-végétation-atmosphère, en incluant les échanges de polluants. Nous nous appuyons aussi sur le Lab Recherche Environnement Vinci-ParisTech les solutions d'installation sur site et pour améliorer nos connaissances sur les interactions bâti-atmosphère-végétation.

figure 24 : Représentation de la combinaison des modèles et des questions sociétales et scientifiques abordées dans le contexte des études du transect urbain-rural.



³⁹ PAUL : H2020 EU Greendead project ; Pilot Application in Urban Landscapes towards integrated city observatories for greenhouse gases - projet conjoint avec les mesures du réseau ICOS.

|

Conclusions

Pour mener à bien les recherches présentées dans ce projet, il me faudra poursuivre voire amplifier la coordination de certains travaux des équipes techniques et scientifiques de l'UMR ECOSYS pour que les questions scientifiques se connectent et que les équipes interagissent sur des objets et des questions communes. Certains éléments du projet nécessitent un renforcement voire un élargissement des collaborations avec d'autres équipes françaises ou étrangères. La **figure 25** apporte la vision d'ensemble des perspectives et les moyens à mettre en place pour mener à bien le projet. Il s'agit notamment de préciser les collaborations en cours et à renforcer pour soutenir les deux axes de travail.

Sur l'axe 1, touchant aux processus à l'échelle de l'unité considérée homogène (la parcelle), il s'agit d'une contribution à l'animation interne à l'équipe Eco&Phy de l'UMR ECOSYS et une poursuite des travaux en cours sur les pesticides et l'ammoniac : 1/ Les développements dans le cadre du projet MIPP, notamment avec C. Bedos et B. Loubet (équipe Eco&Phy), et avec nos partenaires de recherche montpelliérains (LISAH) sur les émissions de pesticides à l'échelle du petit bassin versant sont particulièrement pertinents car nous couplons les processus à l'échelle des parcelles de vignes, nous abordons ces questions de pollutions avec une approche spatiale en s'intéressant aux eaux, aux sols et à l'atmosphère et nous tissons des liens avec les questions de santé publique sur quelques kilomètres carrés ; 2/ le focus de travail sur les processus au niveau des surfaces telles que les rizières est à poursuivre avec les partenaires privilégiés que sont l'IIRR, spécialiste de la production de riz et du CEH spécialiste des processus des zones humides avec qui nous avons une collaboration continue. Sur le sujet des zones humides, je développe les collaborations avec la division Atmospheric Turbulence and diffusion de la NOAA (L. Myles) et le Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences de l'EPA (J.T. Walker) aux USA qui se penchent sur les marais salants et les mangroves en tant qu'objet d'études. Dans ce cadre, j'essaie de développer le co-encadrement de stages de M1 et du cycle ingénieur et je continue d'épauler le travail de N. Lichiheb (ancienne doctorante) qui travaille dans ces deux organismes depuis quelques années. Cela tisse un lien avec les surfaces écologiquement très sensibles ; 3/ à propos de mon implication pour l'émission de COV, c'est sur les développements de modélisation de l'émission que mon travail trouvera sa place. Avec l'expérience de l'adaptation des échanges biosphère-atmosphère pour l'ammoniac, les pesticides et l'ozone, la transposition des échanges aux COV est un prolongement envisageable avec mes collègues de l'équipe Eco&Phy spécialistes des mesures de COV. C'est toutefois sur ce troisième point que je suis aujourd'hui le moins engagé.

Sur l'axe 2, qui vise à orienter les travaux sur le transect ville-campagne et donc à aborder les questions avec une dimension spatiale dépassant largement les parcelles homogènes, deux éléments sont à faire ressortir.

Tout d'abord, au sein de notre UMR, composée de trois équipes (Eco&Phy, Sols et Ecotoxicologie), plusieurs thèmes d'études (« Thèmes Structurants ») ont un lien avec les milieux urbains et périurbains. Le Thème Structurant sur les Produits Résiduels Organiques (PRO) est connecté aux milieux urbains par l'origine possible de ces PRO et le Thème Structurant sur la biodiversité affiche son lien avec les sols remaniés (jardins potagers, sols urbains, etc...) qui sont majoritairement urbains. Un travail serait à mener pour augmenter les liens avec l'équipe Ecotox sur l'exposition de l'environnement aux contaminants induits par les activités urbaines. En somme, il serait intéressant de faire

ressortir une vision intégrative de l'objet « périurbain » dans le sens où il est connecté aux milieux urbains et ruraux. Ça n'est pas ici une vision disciplinaire mais « objet-centrée ». Animer une réflexion dans notre UMR sur la nécessaire vision intégrative du transect ville-campagne est un défi pour mieux répondre aux multiples enjeux de l'organisation des territoires, que ce soit à l'échelle française ou internationale.

Plus spécifiquement au sein de notre équipe Eco&Phy, élargir nos études à des questions qui touchent l'organisation des territoires est important pour répondre aux interactions entre ville et campagne (du point de vue de l'atmosphère, sur le plan microclimatique et dispersif et sur le plan de la qualité de l'air). Pour cela, il s'agit d'amplifier nos collaborations avec les laboratoires qui maîtrisent les outils de climat et de circulation atmosphérique à méso-échelle et les scénarios de changements climatiques. L'IPSL et nos actuels travaux avec le CNRM sur les modèles de quartier urbain végétalisé sont des atouts dans cette orientation. En élargissant notre capacité à travailler avec des modèles de méso-climat et en collaborant avec les équipes travaillant sur les projections de changements climatiques, nous serons plus pertinents pour répondre aux questions d'adaptation et de mitigation des agro et des écosystèmes, notamment en incluant (l'organisation) des territoires en périphérie des espaces urbains. Pourquoi faire ce focus particulier sur le transect ville-campagne, c'est parce que c'est sur ce transect que les évolutions sont les plus importantes.

Pour terminer ce rapport, à nouveau parce que mon activité de coordination touche aussi l'enseignement et que les liens recherche-enseignement nécessitent d'être solides pour préparer les cadres de demain, j'esquisse ici une évolution à envisager dans les prochaines années. Je pense en effet que nous sommes mûrs pour faire évoluer le M2 CLUES ancré sur trois piliers en interaction (« Climat », « Land Use » et « Ecosystem Services ») vers un M2 avec trois sous-parcours. Il me semble opportun de proposer un sous-parcours avec une dimension « climat-biodiversité » renforcée, un sous-parcours avec une dimension « Soil and Land Use » et enfin un dernier sous-parcours incluant fortement l'aménagement urbain. Le premier des sous-parcours serait envisageable avec des mutualisations au sein de la mention Biologie, Ecologie, Evolution de l'UPSay, le second avec le M2 Gestion des Sols et Services Ecosystémiques tandis que le troisième mérite une exploration des solutions et partenariats avec des Grandes Ecoles ou universités s'attaquant au développement urbain durable.

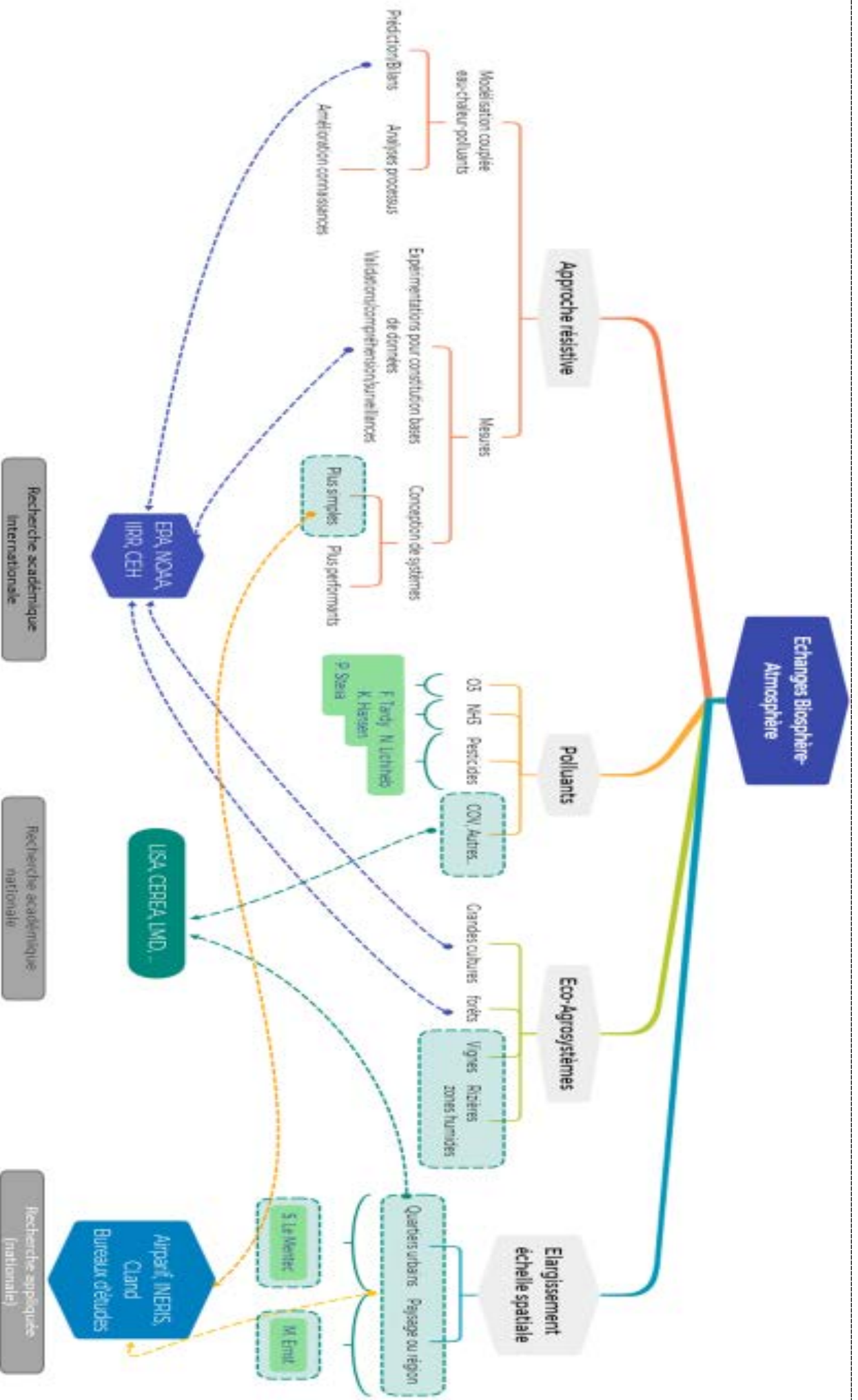


figure 25 : vue d' ensemble des perspectives et des collaborations en cours ou à envisager

les éléments encadrés en pointillés identifient les thèmes à poursuivre. Les liaisons entre éléments de la figure précisent a priori les collaborations à mettre en place ou renforcer pour soutenir les thématiques en question.

Liste Publications – E. Personne

Liste Publications – E. Personne

Date mise à jour : 01/03/2022

ARTICLES DANS REVUES A COMITE DE LECTURE⁴⁰

Personne E., Perrier A., Tuzet A., 2003. Simulating water uptake in the root zone with a microscopic-scale model of root extraction. *Agronomie*, 23, 2, 153-168. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2002081>

Fowler D., Pilegaard K., Sutton M.A., Ambus P., Raivonen M., Duyzer J., Simpson D., Fagerli H., Fuzzi S., Schjoerring J.K., Granier C., Neftel A., Isaksen I.S.A., Laj P., Maione M., Monks P.S., Burkhardt J., Daemmgen U., Neiryck J., **Personne E.**, Wichink-Kruit R., Butterbach-Bahl K., Flechard C., Tuovinen J.P., Coyle M., Gerosa G., Loubet B., Altimir N., Gruenhage L., Ammann C., Cieslik S., Paoletti E., Mikkelsen T.N., Ro-Poulsen H., Cellier P., Cape J.N., Horváth L., Loreto F., Niinemets Ü., Palmer P.I., Rinne J., Misztal P., Nemitz E., Nilsson D., Pryor S., Gallagher M.W., Vesala T., Skiba U., Brüeggemann N., Zechmeister-Boltenstern S., Williams J., O'Dowd C., Facchini M.C., De Leeuw G., Flossman A., Chaumerliac N., Erismann J.W., 2009. Atmospheric composition change: Ecosystems-atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, 43, 33, 5193-5267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.068>

Lamaud E., Loubet B., Irvine M., Stella P., **Personne E.**, Cellier P., 2009. Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 9, 1385-1396. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2009.03.017>

Personne E., Loubet B., Herrmann B., Mattsson M., Schjoerring J., Nemitz E., Sutton M., Cellier P., 2009. SURFATM-NH3 : a model combining the surface energy balance and bi-directional exchanges of ammonia applied at the field scale. *Biogeosciences*, 6, 1371-1388. <http://www.biogeosciences.net/6/1371/2009/bg-6-1371-2009.html>

Sutton M.A., Nemitz E., Milford C., Campbell C., Erismann J.W., Hensen A., Cellier P., David M., Loubet B., **Personne E.**, Schjoerring J.K., Mattsson M., Dorsey J.R., Gallagher M.W., Horvath L., Weidinger T., Meszaros R., Dammggen U., Neftel A., 2009. Dynamics of ammonia exchange with cut grassland: synthesis of results and conclusions of the GRAMINAE Integrated Experiment. *Biogeosciences*, 6, 2907-2934 (special issue). <http://www.biogeosciences.net/6/2907/2009/bg-6-2907-2009.html>

Loubet B., Générumont S., Ferrara R., Bedos C., Decuq G., **Personne E.**, Fanucci O., Durand B., Rana G., Cellier P., 2010. An inverse model to estimate ammonia emissions from fields. *European Journal of Soil Science*, 61, 5, 793-805. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01268.x>

Loubet B., Laville P., Lehuger S., Larmanou E., Fléchard C., Mascher N., Générumont S., Roche R., Ferrara R.M., Stella P., **Personne E.**, Durand B., Decuq C., Flura D., Masson S., Fanucci O., Rampon J.N., Siemens J., Kindler R., Gabrielle B., Schrupf M., Cellier P., 2011. Carbon, nitrogen and Greenhouse gases budgets over a four years crop rotation in northern France. *Plant and Soil*, 343, 1/2, 109-137. <http://dx.doi.org/doi:10.1007/s11104-011-0751-9>

** **Stella P.**, **Personne E.**, Loubet B., Lamaud E., Ceschia E., Béziat P., Bonnefond J.M., Irvine M., Keravec P., Mascher N., Cellier P., 2011. Predicting and partitioning ozone fluxes to maize crops from sowing to harvest: the Surf atm-O3 model. *Biogeosciences*, 8, 10, 2869-2886. <http://dx.doi.org/doi:10.5194/bg-8-2869-2011>

Loubet B., Decuq C., **Personne E.**, Massad R.S., Flechard C., Fanucci O., Mascher N., Gueudet J.C., Masson S., Durand B., Générumont S., Fauvel Y., Cellier P., 2012. Investigating the stomatal, cuticular and soil ammonia fluxes over a growing triticale crop under high acidic loads. *Biogeosciences*, 9, 4, 1537-1552. <http://dx.doi.org/doi:10.5194/bg-9-1537-2012>

Flechard C.R., Massad R.S., Loubet B., **Personne E.**, Simpson D., Bash J.O., Cooter E.J., Nemitz E., Sutton M.A., 2013. Advances in understanding, models and parameterizations of biosphere-atmosphere ammonia exchange. *Biogeosciences*, 10, 5183-5225. <http://dx.doi.org/doi:10.5194/bg-10-5183-2013>

⁴⁰ Les auteurs identifiés en bleu sont les doctorants ou étudiants (co-)encadrés au cours de leur thèse ou stage.

Loubet B., Cellier P., Flécharde C., Zurfluh O., Irvine M., Lamaud E., Stella P., Roche R., Durand B., Flura D., Masson S., Laville P., Garrigou D., **Personne E.**, Chelle M., Castell J.F., 2013. Investigating discrepancies in heat, CO₂ fluxes and O₃ deposition velocity over maize as measured by the eddy-covariance and the aerodynamic gradient methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 35-50. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2012.09.010>

** **Stella P., Personne E.**, Lamaud E., Loubet B., Trebs I., Cellier P., 2013. Assessment of the total, stomatal, cuticular, and soil 2 year ozone budgets of an agricultural field with winter wheat and maize crops. *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences*, 118, 3, 1120–1132. <http://dx.doi.org/doi:10.1002/jgrg.20094>

Sutton M.S., Reis S., Riddick S.N., Dragosits U., Nemitz E., Theobald M.R., Tang Y.S., Braban C.F., Vieno M., Dore A.J., Mitchell R.F., Wanless S., Daunt F., Fowler D., Blackall T.D., Milford C., Flechard C.R., Loubet B., Massad R., Cellier P., **Personne E.**, Coheur P.F., Clarisse L., van Damme M., Ngadi Y., Clerbaux C., Skjøth C.A., Geels C., Hertel O., Wickink Kruit R.J., Pinder R.W., Bash J.O., Walker J.D., Simpson D., Horvath L., Misselbrook T.H., Bleeker A., Dentener F., de Vries W., 2013. Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - B Biological Sciences*, 368, Special issue: The global nitrogen cycle in the 21st century, 13 p., article no 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>

Ferrara R.M., Loubet B., Decuq C., Palumbo A.D., Di Tommasi P., Magliulo V., Masson S., **Personne E.**, Cellier P., Rana G., 2014. Ammonia volatilisation following urea fertilisation in an irrigated sorghum crop in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 179-191. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2014.05.010>

** **Lichiheb N., Personne E.**, Bedos C., Barriuso E., 2014. Adaptation of a resistive model to pesticide volatilization from plants at the field scale: Comparison with a dataset. *Atmospheric Environment*, 83, 260-268. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.004>

** **Lichiheb N.**, Bedos C., **Personne E.**, Benoit P., Bergheaud V., Fanucci O., Bouhrel J., Barriuso E., 2015. Measuring leaf penetration and volatilization of chlorothalonil and epoxiconazole applied on wheat leaves in a laboratory-scale experiment. *Journal of Environmental Quality*, 44, 6, 1782-1790. <http://dx.doi.org/doi:10.2134/jeq2015.03.0165>

** **Personne E., Tardy F.**, Généromont S., Decuq C., Gueudet J.C., Mascher N., Durand B., Masson S., Lauransot M., Flécharde C., Burkhardt J., Loubet B., 2015. Investigating sources and sinks for ammonia exchanges between the atmosphere and a wheat canopy following slurry application with trailing hose. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 11-23. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2015.03.002>

** **Potier E.**, Ogée J., Jouanguy J., Lamaud E., Stella P., **Personne E.**, Durand B., Mascher N., Loubet B., 2015. Multilayer modelling of ozone fluxes on winter wheat reveals large deposition on wet senescing leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211-212, 58-71. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2015.05.006>

** **Lichiheb N., Personne E.**, Bedos C., Van den Berg F., Barriuso E., 2016. Implementation of the effects of physicochemical properties on the foliar penetration of pesticides and its potential for estimating pesticide volatilization from plants. *Science of the Total Environment*, 550, 1022-1031. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.058>

** **Hansen K., Personne E.**, Skjøth C.A., Loubet B., Ibrom A., Jensen R., Sorensen L.L., Boegh E., 2017. Investigating sources of measured forest-atmosphere ammonia fluxes using two-layer bi-directional modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237-238, 80-94. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2017.02.008>

** **Tedesco C.**, Petit C., Billen G., Garnier J., **Personne E.**, 2017. Potential for recoupling production and consumption in peri-urban territories: The case-study of the Saclay plateau near Paris, France. *Food Policy*, 69, 35-45. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.foodpol.2017.03.006>

** **Le Morvan-Quémener A.**, Coll I., Kammer J., Lamaud E., Loubet B., **Personne E.**, Stella P., 2018. Impact of parameterization choices on the restitution of ozone deposition over vegetation. *Atmospheric Environment*, 178, 49-65. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.atmosenv.2018.01.003>

Delon C., Galy-Lacaux C., Serça D., Personne E., Mougin E., Adon M., Le Dantec V., Loubet B., Fensholt R., Tagesson T., 2019. Modelling land-atmosphere daily exchanges of NO, NH₃, and CO₂ in a semi-arid grazed ecosystem in Senegal. *Biogeosciences* 16, 9, 2049-2077. <http://dx.doi.org/doi:10.5194/bg-16-2049-2019>

Massad R.S., Lathière J., Strada S., Perrin M., **Personne E.**, Stéfanon M., Stella P., Szopa S., de Noblet-Ducoudré N., 2019. Reviews and syntheses: influences of landscape structure and land uses on local to regional climate and air quality. *Biogeosciences* 16, 11, 2369-2408. <http://dx.doi.org/doi:10.5194/bg-16-2369-2019>

Lichiheb N., Myles L., **Personne E.**, Heuer M., Buban M., Nelson A.J., Koloutsou-Vakakis S., Rood M.J., Joo E., Miller J., Bernacchi C., 2019. Implementation of the effect of urease inhibitor on ammonia emissions following urea-based fertilizer application at a Zea mays field in central Illinois: A study with SURFATM-NH₃ model. *Agricultural and Forest Meteorology* 269-270, 78-87. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2019.02.005>

Stella P., **Personne E.**, 2021. Effects of conventional, extensive and semi-intensive green roofs on building conductive heat fluxes and surface temperatures in winter in Paris. *Building and Environment* 205, article no 108202, 8 p. <https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2021.108202>

** **Le Mentec, S.**, Stella, P., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Ngao, J., Améglie, T., Colin, J., Flick, D., **Personne, E.**, 2022. Coupling the TEB and Surf atm Models for Heat Flux Modelling in Urban Area: Comparison With Flux Measurements in Strasbourg (France). *Front. Environ. Sci.* 10, 856569. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.856569>

ARTICLES DANS DES REVUES FRANCAISES – Communications scientifiques vers la société.

Loubet B., Stella P., **Personne E.**, Lamaud E., Cellier P., 2013. Un modèle de dépôt d'ozone sur les grandes cultures en Ile-de-France. *Eclairages - R2DS*, 17 (oct-dec 2013), 1-4.

Lichiheb N., Bedos C., **Personne E.**, Barriuso E., 2015. Synthèse des connaissances sur le transfert des pesticides vers l'atmosphère par volatilisation depuis les plantes (State of knowledge on the transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from plants). *Pollution Atmosphérique*, 224. <http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=4732>

Stella P., Petit C., Bedos C., Générumont S., Loubet B., **Personne E.**, Saint-Jean S., 2016. Les espaces périurbains : entre pollution des villes et pollution des champs aux échelles régionale et locale (The periurban areas: between pollution from cities and fields at local and regional scales). *Pollution atmosphérique, no sp. Agriculture et qualité de l'air entre villes et campagnes*, 229-230, septembre 2016, 76-90. <http://www.appa.asso.fr/national/Pages/article.php?art=1271>

CHAPITRES D'OUVRAGES

Personne E., Tuzet A., Perrier A., 2001. Modeling the water consumption of the sparse canopy: Operational approach. In: "*Water Resources Management*", Brebbia C.A., A.P., Katsifarakis K., Cheng A.H.D. (eds.) (Ed.), WIT Press, Southampton (GBR), 249-257.

Flecharc C.R., Massad R.S., Loubet B., **Personne E.**, Simpson D., Bash J.O., Cooter E.J., Nemitz E., Sutton M.A., 2015. Advances in understanding, models and parameterizations of biosphere-atmosphere ammonia exchange. In: "*Review and integration of biosphere-atmosphere modelling of reactive trace gases and volatile aerosols*", Massad, R.S., Loubet, B. (Eds.), Editions Quae / Springer, 11-84.

Loubet B., Castell J.F., Laville P., **Personne E.**, Tuzet A., Ammann C., Emberson L., Ganzeveld L., Kowalski A.S., Merbold L., Stella P., Tuovinen J.P., 2015. O₃ and NO_x exchange. In: "*Review and integration of biosphere-atmosphere modelling of reactive trace gases and volatile aerosols*", Massad, R.S., Loubet, B. (Eds.), Editions Quae / Springer, 163-167.

Personne E., Emberson L., Balezentiene L., Castell J.F., Kowalski A., Tuzet A., Wolff V., 2015. Gaseous stomatal exchange and relation to ecosystem functioning. In: "*Review and integration of biosphere-atmosphere modelling of reactive trace gases and volatile aerosols*", Massad, R.S., Loubet, B. (Eds.), Editions Quae / Springer, 191-198.

Cellier P., Decuq C., Générumont S., Laville P., Loubet B., **Personne E.**, 2015 : Contributions à l'ouvrage : "*Mesurer les émissions gazeuses en élevage : gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote*", Hassouna, M., Eglin, T. (coords.), INRA-ADEME.

Cellier P., Decuq C., Générumont S., Laville P., Loubet B., **Personne E.**, 2016 : Contributions à l'ouvrage : "*Measuring emissions from livestock farming: greenhouse gases, ammonia and nitrogen oxides*", Hassouna, M., Eglin, T., (coords.), INRA-ADEME.

Massad R.S., Tuzet A., **Personne E.**, Bedos C., Beekmann M., Coll I., Drouet J.L., Fortems-Cheiney A., Générumont G., Loubet B., Saint Jean S., 2019. Modélisation des échanges : de l'échelle des processus aux échelles régionales. In: Bedos, C., Générumont, S., Castell, J.F., Cellier, P., coords. (Eds.), *Agriculture et qualité de l'air : comprendre, évaluer, agir*. Editions Quae, Versailles, collection Synthèses, pp. Chap. 5, 157-201.

Massad R.S., Tuzet A., **Personne E.**, Bedos C., Beekmann M., Coll I., Drouet J.-L., Fortems-Cheiney A., Générumont S., Loubet B., Saint-Jean S., 2021. Modelling Exchanges: From the Process Scale to the Regional Scale. *Agriculture and Air Quality*. Springer, pp. 159-207.

COLLOQUES (conférences invitées, présentations orales, posters)

Conférences invitées

Massad R.S., Flechard C., Loubet B., **Personne E.**, 2013. Land - atmosphere ammonia exchange: Do we have the necessary information to contribute to a common conceptual framework for modelling biosphere atmosphere exchanges of gases and aerosols. In: *Proceedings, NADP 2013 Technical Committee Meeting "Western U.S. Monitoring and Analysis: Progress and Current Issues"*, National Atmospheric Deposition Program, Volk, L.A. (Ed.), Park City, UT (USA), 08-11/10/2013, 1 p. (conférence invitée, abstract)

Flechard C., Massad R.S., Loubet B., **Personne E.**, Simpson D., Nemitz E., Sutton M.A., 2012. Land-atmosphere NH₃ exchange: Processes, models, upscaling challenges. In: *Workshop From process scale to global scale: integrating our knowledge on biosphere atmosphere exchange modelling of trace gases and volatile aerosols*, COST, European Cooperation in Science and Technology, Belgique, Paris, 25-27/09/2012. (oral communication, conférence invitée).

Présentations orales et posters

Personne E., Tuzet A., Perrier A., Zurfluh O., Castell J.F., 1999. Echanges énergétiques et hydriques. Modélisation "1D spatialisée" appliquée à des couverts hétérogènes et épars. In: *In: "AMA 99 - Atelier de modélisation de l'atmosphère"*, CNRM Météo-France, Toulouse, 30/11-02/12/1999, 325-328.

Tuzet A., Perrier A., Leuning R., **Personne E.**, 1999. Déterminisme de la conductance stomatique dans un modèle de masse (H₂O, CO₂) et d'énergie. In: *In: "AMA 99 - Atelier de modélisation de l'atmosphère"*, CNRM Météo-France, Toulouse, 30/11-02/12/1999, 297-300.

Cortinovis J., Solmon F., **Personne E.**, Serça D., Rosset R., 2003. Impact of isoprene and nitrogen oxides on O₃ chemistry at the local and the regional scale : the ESCOMPTE experiment. In: *EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice (FRA), 07-11/04/2003*. (K-).

Personne E., Loubet B., 2003. SURFATM : a model combining the surface energy balance and the bi-directional exchanges of pollutant to quantify the deposition and the emission of ammonia at the field scale. In: *EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice (FRA), 07-11/04/2003, 1 p. (poster)*. (K-).

Loubet B., Cellier P., Larmanou E., **Personne E.**, Lamaud E., Irvine M., 2005. Fluxes of heat and pollutants over a maize field near Paris. In: *Colloque CarboRegion, Titise (DEU), 2005*. (oral communication, abstract).

Loubet B., **Personne E.**, Compagnon E., Cellier P., 2005. Surf atm-03: A two-layer SVAT model for ozone and heat including within canopy chemistry with NO_x validation over maize. In: *"The Changing chemical climate of the atmosphere"*, Fuzzi, S., Maione, M. (eds.), 1st Accent Symposium, 12-16/09/2005, Urbino (ITA), Aracne, P. 91 (poster abstract). (K-).

Jabbour B., Golaz F., **Personne E.**, Perrier A., 2007. Durability of ground water used for irrigation: experiments and results from a model. In: *International Conference on Continental Biosphere " Water cycle and vegetation: Analysis and prospective"*, Perrier, A. (coord.), INRA, AgroParisTech, AFEID, CNRS, INSU, Paris (FRA), 27-30/08/2007, p. 94. (poster abstract).

Personne E., Perrier A., Tuzet A., Zurfluh O., Jabbour B., 2007. Bilhyna energy and water balance biophysical model for a field and regional approach. In: *International Conference on Continental Biosphere " Water cycle and vegetation: Analysis and prospective"*, Perrier, A. (coord.), INRA, AgroParisTech, AFEID, CNRS, INSU, Paris (FRA), 27-30/08/2007 p. 98 (abstract). (K-).

Decuq C., Loubet B., **Personne E.**, Ferrara R., Masson S., Flura D., Générumont S., 2008. Effect of temperature on ammonia measurements by semipermeable membrane coupled with conductivity. In: *NitroEurope IP, 3rd Annual Meeting & Open Science Conference, "Reactive nitrogen and the European greenhouse gas balance"*, Ghent (BEL), 20-21/02/2008 p. 43 (poster abstract).

Ferrara R.M., Decuq C., **Personne E.**, Massad R.S., Fanucci O., Loubet B., 2008. Evaluation of evaporation losses in a mini-wedd gradient system for measuring ammonia fluxes. In: *NitroEurope IP, 3rd Annual Meeting & Open Science Conference, "Reactive nitrogen and the European greenhouse gas balance"*, Ghent (BEL), 20-21/02/2008 p. 44 (poster abstract).

Loubet B., Decuq C., **Personne E.**, Ferrara R., Massad R.S., Fanucci O., Générumont S., 2008. A mini-wedd gradient system for measuring ammonia fluxes. In: *NitroEurope IP, 3rd Annual Meeting & Open Science Conference, "Reactive nitrogen and the European greenhouse gas balance"*, Ghent (BEL), 20-21/02/2008, p. 9. (oral communication abstract, conference).

Loubet B., Laville P., Générumont S., Massad R., Lehuger S., Gabrielle B., **Personne E.**, Decuq C., Larmanou E., Flura D., Fanucci O., Durand B., Masson S., Stella P., Tuzet A., P. C., 2009. Mesure et modélisation des flux de composés azotés gazeux à l'échelle de la parcelle agricole. In: *Journées du programme PIREN*, Université Paris 6, Paris (FRA), 02/2009. (présentation orale ?).

Génermont S., Loubet B., Laville P., Lehuger S., Roche R., **Personne E.**, Durand B., Decuq C., Flura D., Masson S., Fanucci O., Larmanou E., Stella P., Mascher N., Cellier P., 2010. Greenhouse gas exchanges as related to the nitrogen and carbon balance of a wheat-barley-mustard-maize rotation. In: *5th International nitrogen Conference*, Raghuram, N., Bijay-Singh, Himanshu Pathak, Altaf Ahmad, Vanita Jain, Madan Pal (eds.) , New Delhi, India, 03-07/12/2010, p. 354. (poster abstract).

Loubet B., Laville P., Lehuger S., Ferrera R., Génermont S., Roche R., **Personne E.**, Durand B., Decuq C., Flura D., Masson S., Fanucci O., Larmanou E., Stella P., Mascher N., Cellier P., 2010. Nitrogen and carbon balance of a wheat-barley-mustard-maize rotation over two-years near Paris (France). In: *Proceedings, Open Science Conference NitroEurope IP Reactive nitrogen and the European greenhouse gas balance*, Solothurn (CHE), 03-04/02/2010, 1.16, p. 19. (oral communication, abstract)

Bedos C., **Personne E.**, Lichiheb N., Magandji-Douckagha G., Barriuso E., 2011. Modelling pesticide volatilization from crop at the field scale. In: *"Pesticides in the environment: fate, modelling and risk mitigation", XIV Symposium in Pesticide Chemistry*, , Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza (ITA), 30/08-01/09/2011, 16 diapos powerpoint. (oral communication).

Loubet B., Decuq C., **Personne E.**, Massad R.S., Flechard C., Fanucci O., Mascher N., Guedet J.C., Masson S., Durand B., Génermont S., Fauvel Y., Cellier P., 2011. Ammonia concentrations and fluxes above a growing triticale crop in northern France. In: *Nitrogen & Global Change: Key findings – future challenges, Conference Proceedings*, Edinburgh (GBR), 11-15/04/2011, 2 p. (oral communication, extended abstract).

Loubet B., Génermont S., **Personne E.**, Massad R.S., 2011. Can we estimate ammonia emissions by inverse modelling with time averaged concentrations ? In: *Nitrogen & Global Change: Key findings – future challenges, Conference Proceedings*, Edinburgh (GBR), 11-15/04/2011, 2 p. (poster, extended abstract).

Stella P., **Personne E.**, Loubet B., Lamaud E., Mascher N., Cellier P., 2011. SURFATM-O3: a new model for partitioning ozone deposition over agro-ecosystems. Development and application to a maize canopy. In: *Nitrogen & Global Change: Key findings – future challenges, Conference Proceedings*, Edinburgh (GBR), 11-15/04/2011, 2 p. (poster, extended abstract)

Lichiheb N., Bedos C., **Personne E.**, Benoit P., Bouhleb J., Bergheaud V., Fanucci O., Trivella A., Richard C., Barriuso E., 2013. Development and validation of a mechanistic pesticide emission model at the field scale: toward a tool for evaluating the sources of atmospheric contamination by pesticides. In: *Conference Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air*, York (GBR), Septembre 2013 (oral communication).

Loubet B., Massad R.S., Laville P., Mascher N., Guedet J.C., Durand B., Decuq C., **Personne E.**, Génermont S., Bedos C., Cellier P., Gabrielle B., 2013. Modelled and measured greenhouse gases emissions from a typical Île-De-France crop rotation between 2005 and 2013. Influence of climatic conditions and sensitivity to nitrogen exchange with the atmosphere. In: *Open Science Conference Greenhouse Gas Management in European Land Use Systems*, Antwerp (BEL), 16-18/09/2013, 1 p. (poster abstract).

Blanchon C., Loubet B., **Personne E.**, Massad R.S., Maury O., Drouet J.L., 2014. Coupled modelling of bidirectional exchanges and atmospheric transfer of nitrogen within rural landscapes. In: *ECLAIRE Open Science Conference "Integrating Impacts of Air Pollution and Climate Change on Ecosystems"*, ECLAIRE Project, Budapest (Hungary), 01-02/10/2014, 1 p. (poster).

Lichiheb N., Bedos C., **Personne E.**, Barriuso E., Van den Berg F., 2014. Modeling pesticide volatilization from plants at the field scale: Comparison of the SURFATM-Pesticides and PEARL models. In: *248th National Meeting of the American-Chemical-Society (ACS). Abstracts of papers*, ACS - American Chemical Society, San Francisco, Ca (USA), 10-14/08/2014 (abstract). (poster)

Sibble D., Caldwell J., Caillaud T., Johnson E., **Personne E.**, Saylor R., Heuer M., Nelson A., Rood M., Koloutsou-Vakakis S., Myles L., 2014. Estimating atmospheric NH₃ exchange in the Midwest U.S. using SURFATM-NH₃. In: *AGU Fall meeting 2014, American Geophysical Union*, San Francisco (USA), 14-19/12/2014, (abstract). Oral presentation

Lichiheb N., Myles L., **Personne E.**, Heuer M., Buban M., 2017. Evaluation of ammonia air-surface exchange at the field scale: Improvement of soil and stomatal emission potential parameterization in a modelling approach. In: *ACS, American Chemical Society*, 20-25/08/2017, 1 p. (poster).

Voltz M., Bedos C., Fabre J.C., Loubet B., Chataigner M., Bankwal P., Barriuso E., Benoit P., Brunet Y., Casellas E., Chabrier P., Chambon C., Crevoisier D., Dages C., Douzals J.P., Drouet J.L., Lafolie F., Mamy L., Moitrier N., **Personne E.**, Pot V., Raynal H., Ruelle B., Samouelian A., Saudreau M., 2017. Modélisation intégrée du devenir des pesticides. In: *Colloque Modélisation de paysages agricoles pour la simulation et l'analyse de processus*, INRA réseau interdisciplinaire PAYOTE, Paris, 04-05/10/2017, 1 p. (communication orale, résumé).

Voltz M., Bedos C., JC F., Loubet B., Chataigner M., Bankwal P., Barriuso E., Benoit P., Brunet Y., Casellas E., Chambon C., Crevoisier D., Dages C., Douzals J.-P., Drouet J.L., Lafolie F., Mamy L., Moitrier N., **Personne E.**, Pot V., 2017. Integrated Modelling of pesticide fate in agricultural landscapes. In: *7th International Conference on Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air*, York (GBR), 30/08-01/09/2017 (oral communication abstract).

Bedos C., Voltz M., Crevoisier D., Dages C., J.C. F., Lafolie F., Loubet B., **Personne E.**, Casellas E., Chabrier P., Chataigner M., Chambon C., Nouguier C., Bankwal P., Barriuso E., Benoit P., Brunet Y., Douzals J.-P., Drouet J.L., Mamy L., Moitrier N., Pot V., Raynal H., Ruelle B., Samouelian A., Saudreau M., 2019. Integrated modelling of pesticide fate in landscapes for designing sustainable agricultural management strategies. Advances in Risk Assessment and Management. Presented at the XVI Symposium in Pesticide Chemistry, Piacenza (Italy).

Voltz M., Bedos C., Crevoisier D., Dages C., J.C. F., Lafolie F., Loubet B., **Personne E.**, Casellas E., Chabrier P., Chataignier M., Chambon C., Nouguier C., Bankwal P., Barriuso E., Benoit P., Brunet Y., Douzals J.-P., Drouet J.L., Mamy L., Moitrier N., Pot V., Raynal H., Ruelle B., Samouelian A., Saudreau M., 2019. Integrated Modelling of pesticide fate in agricultural landscapes: the MIPP Project. 21st International Fresenius AGRO Conference Behaviour of Pesticides in Air, Soil and Water,, Mainz (Germany).

Lichiheb N., Personne E., Walker J.T., Saylor R., Wu Z., Chen X., Schwede D.B., Oishie A.C., 2019. Modeling bi-directional fluxes of NH₃ in a forest ecosystem using SURFATM-NH₃ model: A study with a dataset from a deciduous montane forest in the southeastern. 99th AMS annual Meeting, Phoenix, AZ (USA).

Journées d'études :

Personne E., Durand B., 2010. Mesure d'humidité du sol par la méthode " TDR " (Time Domain Reflectometry)- Recherche de traitements des données brutes pour corriger les variations journalières dues à des effets " température ". In: *Journées de la Mesure et de la Métrologie J2M 2010*, INRA, Nouan-le-Fuzelier (FRA), 11-14/10/2010, p. 24. (résumé et communication orale).

Maugis P., Béguinel P., Saint-Jalmes M., Berthier E., Li Y., Ramier D., Dumont E., Marlin C., Pessel M., Quantin C., Durand V., Gibert E., **Personne E.**, Petit C., Aubry C., Lemaire B., Ducharme A., 2015. Caractérisation hydrologique de l'interface Sol-Végétation-Atmosphère Groupe de travail sur l'hydrologie du Plateau de Saclay. In: *JSS 2015*, 1 p..

Personne E., 2015. SPARTACUS : Surface, PARTicules, Ammoniac, zones Cultivées et périUrbaines. In: *Journées scientifiques annuelles BASC 2015*, Gif-sur-Yvette (FRA), 19-20/03/2015, 1 p.

Stella P., de Noblet N., **Personne E.**, Aubry C., Petit C., Hauglustaine D., Ciais P., 2015. MOTUS « Modeling of Temperature in Urban and peri-urban Systems ». In: *Journées scientifiques annuelles BASC 2015*, Gif-sur-Yvette (FRA), 19-20/03/2015, 1 p.

Fortineau A., Loubet B., Généromont S., **Personne E.**, Decuq C., Esnault B., Carozzi M., Voylokov P., Buysse P., Burban M., Fanucci O., Duprix P., 2019. Evaluation d'un dispositif contrôlé d'émission d'ammoniac à l'échelle de la parcelle agricole. Journée Scientifique SIRTA 2019, Palaiseau (FRA).

RAPPORTS DE PROJETS

Bethenod O., Castell J.F., Lasram A., Perrier A., **Personne E.**, Rosnoblet J., Tuzet A., Zurfluh O., Huber L., Geagea L., Saint-Jean S., 1999. Echanges énergétiques et hydriques au niveau des couverts hétérogènes. Mécanismes de dispersion de particules biotiques à l'échelle locale. In: *Séminaire "Transferts"*, INRA Département Environnement et Agronomie, La Hume, 16-17/03/1999, pp.37-39 (résumé)

Tuzet A., Coquet Y., Perrier A., Zurfluh O., Coutadeur C., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J., Bethenod O., **Personne E.**, Huet P., Michelin J., Fournier B., Carré F., Girard M.C., Bresson L.M., Gilliot J.M., 2002. Analyse du rôle des hétérogénéités spatiales. In: "*Projet ARHES, UMR INRA/INAPG Environnement et Grandes Cultures - Rapport, 3 p.*",

Perrier A., Golaz F., Tuzet A., **Personne E.**, Jabbour B., Meridja S., Zurfluh O., 2003. Projet d'utilisation du modèle "Bilhyna" en Beauce. In: "*Rapport année 2002 , Chambre d'Agriculture d'Eure-et-Loire, INRA INA PG UMR Environnement et Grandes Cultures, Grignon, 30 p.*",

Cellier P., Dizengremel P., Castell J.F., Lamaud E., Loubet B., **Personne E.**, Serça D., Bethenod O., Biolley J.P., Chartier M., Chelle M., Cortinovic J., Delon C., Irvine M., Lebard S., Leitao L., Le Thiec D., Roche R., Tuzet A., 2004. BioPollAtm: Biosphère et pollution atmosphérique en zone rurale et périurbaine. In: "*Rapport de fin de contrat, Programme Predit GP07 Primequal 2, no de contrat Ademe 02 62 030, INRA UMR Environnement et Grandes Cultures de Grignon, 130 p.*",

Cellier P., Dizengremel P., Castell J.F., Lamaud E., Loubet B., **Personne E.**, Serça D., Bethenod O., Biolley J.P., Chartier M., Chelle M., Cortinovic J., Delacote E., Delon C., Irvine M., Lebard S., Leitao L., Le Thiec D., Roche R., Tuzet A., 2005. Dépôt d'ozone sur un couvert végétal: Mécanismes et conséquences. Résultats du projet Biopollatm. In: *ECCO Ecosphère Continentale, Vauclin, M. (ed.), 1er Colloque de restitution Scientifique, Toulouse, 05-07/12/2005, 151-156. (K-)*.

Cellier P., Bethenod O., Castell J.F., Chelle M., Lebard S., Loubet B., **Personne E.**, Roche R., Tuzet A., Zurfluh O., Irvine M., Lamaud E., Dizengremel P., Le Thiec D., Jolivet Y., Biolley J.P., Leitao L., Delmas R., Cortinovic J., Rosset R., Serça D., Delon C., 2006. BIOPOLLATM : Biosphère et pollution atmosphérique en zone rurale et périurbaine. In: "*Rapport de fin de projet ECCO-PNBC.*",

Personne E., Loubet B., Decuq C., Fanucci O., Ferrara R.M., Générumont S., 2007. ROSAA : ROBust and Sensitive Ammonia Analyser. In: "Mise au point d'un système de mesure de flux d'ammoniac (NH3). Rapport de synthèse, Projet Innovant 2006-2007, UMR INRA Environnement et Grandes Cultures de Grignon, en collaboration avec l'Université de Bari, Déc. 2007, 26 p.",

Magandji G., **Personne E.**, Moreau-Guigon E., Bedos C., Blanchoud H., 2009. Modélisation de la volatilisation des pesticides à partir du couvert végétal In: "Rapport du PIREN-Seine", 17 p.

Bedos C., Loubet B., Decuq C., Durand B., Fanucci O., Chakkour S., Lecuyer V., Deschamps M., Générumont S., **Personne E.**, Barriuso E., 2016. Contamination des eaux de surface par les pesticides : extension et évaluation d'un outil d'évaluation de la part des apports aériens. Rapport Final de projet financé par l'ONEMA (Action n°27), 74 p.

Personne E., Loubet B., Générumont S., Bedos C., Cellier P., Lathière J., Hauglustaine D., Stella P., Meleux F., Cheney A., Flécharde C., Avril 2017. Rapport Projet **SPARTACUS** Labex BASC.: Surface, PARTicules, Ammoniac, zones Cultivées et périUrbaineS.,10 pages.

Lorinquer E., Charpiot A., Dollé J.B., Foray S., Raynal J., Bell M., Flecharde C., Fauvel Y., Robin P., Hassouna M., Lecomte M., Guiziou F., Loyon L., Lassalas J., Sidaner D., Lambertson P., Edouard N., Faverdin P., Gabriel J., Pansard A., Générumont S., **Personne E.**, Loubet B., Decuq C., 2016. Emissions gazeuses au Bâtiment, sTockage, Épandage et Pâturage des systèmes bovins laitiers (BTéP). Rapport final, étude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'Institut de l'Élevage, l'UMR INRA SAS, l'IRSTEA Rennes, l'IEPL de Méjusseume, l'UMR INRA PEGASE et l'UMR INRA ECOSYS) (Contrat n° : 13-60-C0032), 109 p.

Personne E., Abbou G., Joly L., Sanchez O., Cousin J., Decarpentrie T., Decuq C., Dumelie N., Esnault B., Fortineau A., Gueudet J.-C., 2019. Développement de nouveaux dispositifs de mesures des des émissions d'ammoniac dans l'air pour l'ammoniac en région parisienne – **NUAGE** : Test des NoUveaux dispositifs pour mieux évaluer les flux d'Ammoniac dans l'atmosphère depuis les aGrosystèmes et Ecosystèmes et interprétation de la campagne de mesures à l'échelle Île-de-France. Rapport, ADEME, 106 pages.

BREVETS

Analyseur ROSAA (Robust and Sensitive Ammonia Analyser). Analyseur d'ammoniac multi-canaux permettant la mesure des flux d'ammoniac (NH₃) au-dessus d'un écosystème agricole. Cet analyseur a fait l'objet d'un dépôt de brevet. – Dépôt : n° 10 55253 déposé le 29 juin 2010. Pour :

« Installation pour la capture en continu d'un analyte gazeux susceptible d'être contenu dans l'air, et pour la mesure en ligne de la concentration dudit analyte gazeux dans l'air ». Responsable scientifique Brevet : **E. Personne**

Déclarations d'invention :

Loubet B., **Personne E.**, Decuq C., Fanucci O., Cellier P., 2011. Installation pour la capture en continu d'un analyte gazeux susceptible d'être contenu dans l'air, et pour la mesure en ligne de la concentration dudit analyte gazeux dans l'air. In: INRA (Ed.), France, p. 51 p. Rapport scientifique conclusif pour le dépôt de brevet.

Personne E., Decuq C., Fanucci O., Fortineau A., Gueudet J-C., Loubet B., 2018a. Dispositif Badges Alpha conditionnels. INRA. Déclaration d'invention. No de la DIRV DI-RV-18-0107. Novembre 2018.

Personne E., Le Borgne C., Adam B., Fortineau A., 2018b. Capteur microclimatique actionneur radio-pilotable. INRA. Déclaration d'invention. No de la DIRV DI-RV-18-0108. Novembre 2018.

Personne E., Stella P., Bedos, Loubet B. 2019. Méthode d'évaluation par modélisation des flux bidirectionnels de composés gazeux considérés comme polluants (exemple de l'ammoniac, l'ozone et les pesticides) d'un écosystème terrestre (parcelle agricole ou couvert naturel) avec prise en compte des différentes voies (sol et plante). Déclaration d'invention, DI-RV-19-0039, UMR INRA ECOSYS Grignon, Mai 2019.

Bibliographie citée dans le rapport

- A. Xiu, J. E. Pleim, 2001. Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. 40, 192–209.
- Ainsworth, E.A., Yendrek, C.R., Sitch, S., Collins, W.J., Emberson, L.D., 2012. The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change. *Annual Review of Plant Biology* 63, 637–661. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>
- Allen, R., 2005. PENMAN–MONTEITH EQUATION, in: Hillel, D. (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, Oxford, pp. 180–188. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00399-4>
- Altimir, N., Kolari, P., Tuovinen, J.P., Vesala, T., Back, J., Suni, T., Kulmala, M., Hari, P., 2006. Foliage surface ozone deposition: a role for surface moisture? *Biogeosciences* 3, 209–228.
- Ammonia (NH₃) emissions — European Environment Agency [WWW Document], n.d. URL <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-ammonia-nh3-emissions-1/assessment-4> (accessed 3.10.22).
- ANSES - rapport expertise 2017, n.d.
- Avissar, R., Verstraete, M.M., 1990. The representation of continental surface processes in atmospheric models. *Rev. Geophys.* 28, 35. <https://doi.org/10.1029/RG028i001p00035>
- Avnery, S., Mauzerall, D.L., Liu, J., Horowitz, L.W., 2011. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution. *Atmospheric Environment* 45, 2297–2309. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.002>
- Ball, J.T., Woodrow, I.E., Berry, J.A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions, in: *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp. 221–225.
- Bange, G.G.J., 1953. ON THE QUANTITATIVE EXPLANATION OF STOMATAL TRANSPIRATION. *Acta Botanica Neerlandica* 2, 255–297. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1953.tb00275.x>
- Barker, J.R., Tingey, D.T., 2012. *Air Pollution Effects on Biodiversity*. Springer Science & Business Media.
- Bedos, C., Cellier, P., Calvet, R., Barriuso, E., Gabrielle, B., 2002. Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview. *Agronomie* 22, 21–33. <https://doi.org/10.1051/agro:2001003>
- Bergmann, E., Bender, J., Weigel, H.-J., 2017. Impact of tropospheric ozone on terrestrial biodiversity: A literature analysis to identify ozone sensitive taxa. *Journal of Applied Botany and Food Quality* Vol 90 (2017): *Journal of Applied Botany and Food Quality*. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2017.090.012>
- Bittman, S., Jones, K., Vingarzan, R., Hunt, D.E., Sheppard, S.C., Tait, J., So, R., Zhao, J., 2015. Weekly agricultural emissions and ambient concentrations of ammonia: Validation of an emission inventory. *Atmospheric Environment* 113, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.038>
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erismann, J.-W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L., De Vries, W., 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications* 20, 30–59. <https://doi.org/10.1890/08-1140.1>
- Bonan, G.B., Patton, E.G., Finnigan, J.J., Baldocchi, D.D., Harman, I.N., 2021. Moving beyond the incorrect but useful paradigm: reevaluating big-leaf and multilayer plant canopies to model biosphere-atmosphere fluxes – a review. *Agricultural and Forest Meteorology* 306, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108435>
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments (phdthesis). Université de Nantes.

- Bou-Zeid, E., Anderson, W., Katul, G.G., Mahrt, L., 2020. The Persistent Challenge of Surface Heterogeneity in Boundary-Layer Meteorology: A Review. *Boundary-Layer Meteorol* 177, 227–245. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00551-8>
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13, 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Brutsaert, W., 1998. Land-surface water vapor and sensible heat flux: Spatial variability, homogeneity, and measurement scales. *Water Resources Research* 34, 2433–2442. <https://doi.org/10.1029/98WR01340>
- Brutsaert, W., 1975. A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surfaces at ground level. *Water Resources Research* 11, 543–550. <https://doi.org/10.1029/WR011i004p00543>
- Burkhardt, J., Flechard, C.R., Gresens, F., Mattsson, M., Jongejan, P.A.C., Erisman, J.W., Weidinger, T., Meszaros, R., Nemitz, E., Sutton, M.A., 2009. Modelling the dynamic chemical interactions of atmospheric ammonia with leaf surface wetness in a managed grassland canopy. *Biogeosciences* 6, 67–84. <https://doi.org/10.5194/bg-6-67-2009>
- BUSINGER, J.A., 1973. Turbulence transfer in the atmospheric surface layer. *Workshop on Micrometeorology* 67–100.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 92, 73–95. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00091-4)
- Calvet, R., 1998. Modélisation du devenir des herbicides dans les sols : Analyse de quelques limites, in: *Journées Internationales Sur La Lutte Contre Les Mauvaises Herbes;Annales ANPP. Association Nationale de Protection des Plantes;Paris, 17. Conférence du COLUMA;Dijon, pp. 257–264.*
- Castell, J.F., Lebard, S., 2003. Impacts potentiels de la pollution par l’ozone sur le rendement du blé en Ile-de-France : analyse de la variabilité spatio-temporelle. *Pollution Atmosphérique* 179, 405–418.
- Castell, J.-F., Thiec, D.L., 2017. Impacts de l’ozone sur l’agriculture et les forêts et estimation des coûts économiques [WWW Document]. <http://irevues.inist.fr/pollution-atmospherique>. <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5690>
- Cellier, P., n.d. BIOPOLL’ATM BIOspère et POLLuution ATMosphérique en zone rurale et périurbaine 5.
- Choudhury, B.J., Monteith, J.L., 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 114, 373–398. <https://doi.org/10.1002/qj.49711448006>
- Cowan, I.R., 1977. Stomatal behaviour and environment. *Advances Botany Research* 5, 117–228.
- Cowan, I.R., 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *Journal Applied Ecology* 2, 221–239.
- Davies, A., Evans, D., 2019. Urban food sharing: Emerging geographies of production, consumption and exchange. *Geoforum* 99, 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.11.015>
- Deardorff, J.W., 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research* 83, 1889–1903.
- Delon, C., Galy-Lacaux, C., Serça, D., Personne, E., Mougín, E., Adon, M., Le Dantec, V., Loubet, B., Fensholt, R., Tagesson, T., 2019. Modelling land–atmosphere daily exchanges of NO, NH₃, and CO₂ in a semi-arid grazed ecosystem in Senegal. *Biogeosciences* 16, 2049–2077. <https://doi.org/10.5194/bg-16-2049-2019>
- Ducoudré, N.I., Laval, K., Perrier, A., 1993. SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land-Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General Circulation Model. *Journal of Climate* 6, 248–273.
- Dyer, A.J., 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology* 7, 363–372.
- Dyer, A.J., Hicks, B.B., 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 96, 715–721. <https://doi.org/10.1002/qj.49709641012>

- E. Personne, Loubet B., 2003. SURFATM : a model combining the surface energy balance and the bi-directional exchanges of pollutant to quantify the deposition and the emission of ammonia at the field scale. Nice, France.
- Emberson, L., 2020. Effects of ozone on agriculture, forests and grasslands. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190327. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0327>
- Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Cambridge, H.M., Simpson, D., 2000. Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* 11.
- Erismann, J.W., Sutton, M.A., 2008. Reduced nitrogen in ecology and the environment: Special issue of the ESF-FWF Conference in partnership with LFUI, October 2006. *Environmental Pollution* 154, 357–358. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.05.001>
- Erismann, J.W., Vermeulen, A., Hensen, A., Flechard, C., Dämmgen, U., Fowler, D., Sutton, M., Grünhage, L., Tuovinen, J.-P., 2005. Monitoring and modelling of biosphere/atmosphere exchange of gases and aerosols in Europe. *Environmental Pollution* 133, 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.07.004>
- European Environment Agency., 2020. Air quality in Europe: 2020 report. Publications Office, LU.
- Fahmy, M., Sharples, S., 2009. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment* 44, 1907–1916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.010>
- Famulari, D., Fowler, D., Nemitz, E., Hargreaves, K.J., Storeton-West, R.L., Rutherford, G., Tang, Y.S., Sutton, M.A., Weston, K.J., 2010. Development of a low-cost system for measuring conditional time-averaged gradients of SO₂ and NH₃. *Environmental Monitoring and Assessment* 161, 11–27. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0723-6>
- Farquhar, G.D., Firth, P.M., Wetselaar, R., Weir, B., 1980. On the Gaseous Exchange of Ammonia between Leaves and the Environment: Determination of the Ammonia Compensation Point 66, 5.
- Ferrara, R.M., Loubet, B., Decuq, C., Palumbo, A.D., Di Tommasi, P., Magliulo, V., Masson, S., Personne, E., Cellier, P., Rana, G., 2014. Ammonia volatilisation following urea fertilisation in an irrigated sorghum crop in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* 195–196, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.010>
- Fick, A., 1855. V. On liquid diffusion. *Phil. Mag.* 10, 30–39. <https://doi.org/10.1080/14786445508641925>
- Flechard, C.R., Fowler, D., Sutton, M.A., Cape, J.N., 1999. A dynamic chemical model of bi-directional ammonia exchange between semi-natural vegetation and the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 125, 2611–2641.
- Flechard, C.R., Massad, R.-S., Loubet, B., Personne, E., Simpson, D., Bash, J.O., Cooter, E.J., Nemitz, E., Sutton, M.A., 2013. Advances in understanding, models and parameterizations of biosphere-atmosphere ammonia exchange. *Biogeosciences* 10, 5183–5225. <https://doi.org/10.5194/bg-10-5183-2013>
- Fowler, D., Pilegaard, K., Sutton, M.A., Ambus, P., Raivonen, M., Duyzer, J., Simpson, D., Fagerli, H., Fuzzi, S., Schjoerring, J.K., Granier, C., Neftel, A., Isaksen, I.S.A., Laj, P., Maione, M., Monks, P.S., Burkhardt, J., Daemmgen, U., Neiryneck, J., Personne, E., Wichink-Kruit, R., Butterbach-Bahl, K., Flechard, C., Tuovinen, J.P., Coyle, M., Gerosa, G., Loubet, B., Altimir, N., Gruenhage, L., Ammann, C., Cieslik, S., Paoletti, E., Mikkelsen, T.N., Ro-Poulsen, H., Cellier, P., Cape, J.N., Horváth, L., Loreto, F., Niinemets, Ü., Palmer, P.I., Rinne, J., Misztal, P., Nemitz, E., Nilsson, D., Pryor, S., Gallagher, M.W., Vesala, T., Skiba, U., Brüggemann, N., Zechmeister-Boltenstern, S., Williams, J., O'Dowd, C., Facchini, M.C., de Leeuw, G., Flossman, A., Chaumerliac, N., Erismann, J.W., 2009a. Atmospheric composition change: Ecosystems–Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment, ACCENT Synthesis* 43, 5193–5267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.068>
- Fowler, D., Pilegaard, K., Sutton, M.A., Ambus, P., Raivonen, M., Duyzer, J., Simpson, D., Fagerli, H., Fuzzi, S., Schjoerring, J.K., Granier, C., Neftel, A., Isaksen, I.S.A., Laj, P., Maione, M., Monks, P.S., Burkhardt, J., Daemmgen, U., Neiryneck, J., Personne, E., Wichink-Kruit, R., Butterbach-Bahl, K., Flechard, C., Tuovinen, J.P., Coyle, M., Gerosa, G., Loubet, B., Altimir, N., Gruenhage, L.,

- Ammann, C., Cieslik, S., Paoletti, E., Mikkelsen, T.N., Ro-Poulsen, H., Cellier, P., Cape, J.N., Horváth, L., Loreto, F., Niinemets, Ü., Palmer, P.I., Rinne, J., Misztal, P., Nemitz, E., Nilsson, D., Pryor, S., Gallagher, M.W., Vesala, T., Skiba, U., Brüggemann, N., Zechmeister-Boltenstern, S., Williams, J., O'Dowd, C., Facchini, M.C., de Leeuw, G., Flossman, A., Chaumerliac, N., Erisman, J.W., 2009b. Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment* 43, 5193–5267.
- France, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Eds.), 2013. Pesticides: effets sur la santé, Expertise collective. INSERM, Instituts thématiques, Paris.
- Fuhrer, J., Val Martin, M., Mills, G., Heald, C.L., Harmens, H., Hayes, F., Sharps, K., Bender, J., Ashmore, M.R., 2016. Current and future ozone risks to global terrestrial biodiversity and ecosystem processes. *Ecology and Evolution* 6, 8785–8799. <https://doi.org/10.1002/ece3.2568>
- Galloway James N., Townsend Alan R., Erisman Jan Willem, Bekunda Mateete, Cai Zucong, Freney John R., Martinelli Luiz A., Seitzinger Sybil P., Sutton Mark A., 2008. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320, 889–892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J., 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience* 53, 341–356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Galmarini, S., Vilà-Guerau de Arellano, J., Duyzer, J., 1997. Fluxes of chemically reactive species inferred from mean concentration measurements. *Atmospheric Environment* 31, 2371–2374. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00026-5)
- Ganzeveld, L., Ammann, C., Loubet, B., 2015. Modelling Atmosphere-Biosphere Exchange of Ozone and Nitrogen Oxides, in: Massad, R.-S., Loubet, Benjamin (Eds.), *Review and Integration of Biosphere-Atmosphere Modelling of Reactive Trace Gases and Volatile Aerosols*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 85–105. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7285-3_3
- Ganzeveld, L., Bouwman, L., Stehfest, E., van Vuuren, D.P., Eickhout, B., Lelieveld, J., 2010. Impact of future land use and land cover changes on atmospheric chemistry-climate interactions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115. <https://doi.org/10.1029/2010JD014041>
- Garcia, L., Bedos, C., Géniermont, S., Braud, I., Cellier, P., 2011. Assessing the ability of mechanistic volatilization models to simulate soil surface conditions. *Science of The Total Environment* 409, 3980–3992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.003>
- Géniermont, S., Cellier, P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88, 145–167. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00044-0)
- Glotfelty, D.E., Taylor, A.W., Turner, B.C., Zoller, W.H., 1984. Volatilization of surface-applied pesticides from fallow soil. *J. Agric. Food Chem.* 32, 638–643. <https://doi.org/10.1021/jf00123a053>
- Grunke, N.E., Heath, R.L., 2020. Ozone effects on plants in natural ecosystems. *Plant Biol J* 22, 12–37. <https://doi.org/10.1111/plb.12971>
- Grunhage, L., Haenel, H.D., 1997. Platin (plant-atmosphere interaction) I: A model of plant-atmosphere interaction for estimating absorbed doses of gaseous air pollutants. *Environmental Pollution* 98, 37–50.
- Guenther, A.B., Monson, R.K., Fall, R., 1991. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 96, 10799–10808. <https://doi.org/10.1029/91JD00960>
- Guenther, A.B., Zimmerman, P.R., Harley, P.C., Monson, R.K., Fall, R., 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 98, 12609–12617. <https://doi.org/10.1029/93JD00527>
- Guthrie, S., Giles, S., Dunkerley, F., Tabaqchali, H., 2018. The impact of ammonia emissions from agriculture on biodiversity. *The Royal Society, Rand Europe* 76.
- Hamaoui-Laguel, L., Meleux, F., Beekmann, M., Bessagnet, B., Géniermont, S., Cellier, P., Létinois, L., 2014. Improving ammonia emissions in air quality modelling for France. *Atmospheric Environment* 92, 584–595. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.002>

- Hansen, K., Personne, E., Skjøth, C.A., Loubet, B., Ibrom, A., Jensen, R., Sørensen, L.L., Boegh, E., 2017. Investigating sources of measured forest-atmosphere ammonia fluxes using two-layer bi-directional modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 237–238, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.008>
- Harper, L.A., McDowell, L.L., Willis, G.H., Smith Jr., S., Southwick, L.M., 1983. Microclimate Effects on Toxaphene and DDT Volatilization from Cotton Plants¹. *Agronomy Journal* 75, 295–302. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500020031x>
- Harper, L.A., White Jr., A.W., Bruce, R.R., Thomas, A.W., Leonard, R.A., 1976. Soil and Microclimate Effects on Trifluralin Volatilization. *Journal of Environmental Quality* 5, 236–242. <https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500030004x>
- Hazra, D.K., Purkait, A., 2019. Role of pesticide formulations for sustainable crop protection and environment management: A review. *Journal of Pharmacognosy and phytochemistry* 8, 8.
- He, C., Clifton, O., Felker-Quinn, E., Fulgham, S.R., Juncosa Calahorrano, J.F., Lombardozi, D., Purser, G., Riches, M., Schwantes, R., Tang, W., Poulter, B., Steiner, A.L., 2021. Interactions between Air Pollution and Terrestrial Ecosystems: Perspectives on Challenges and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102, E525–E538. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0066.1>
- HEI, 2018. Health Effect Institute.
- Hicks, B.B., Baldocchi, D.D., Meyers, T.P., Hosker, R.P., Matt, D.R., 1987. A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities. *Water Air and Soil Pollution* 36, 311–330.
- Husted, S., Mattsson, M., Schjørring, J.K., 1996. Ammonia compensation points in two cultivars of *Hordeum vulgare* L. during vegetative and generative growth. *Plant, Cell and Environment* 19.
- Isaksen, I.S.A., Granier, C., Myhre, G., Berntsen, T.K., Dalsøren, S.B., Gauss, M., Klimont, Z., Benestad, R., Bousquet, P., Collins, W., Cox, T., Eyring, V., Fowler, D., Fuzzi, S., Jöckel, P., Laj, P., Lohmann, U., Maione, M., Monks, P., Prevo, A.S.H., Raes, F., Richter, A., Rognerud, B., Schulz, M., Shindell, D., Stevenson, D.S., Storelvmo, T., Wang, W.-C., van Weele, M., Wild, M., Wuebbles, D., 2009. Atmospheric composition change: Climate–Chemistry interactions. *Atmospheric Environment* 43, 5138–5192. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.003>
- Iversen, M., Pedersen, B., 1990. Relation between respiratory symptoms, type of farming, and lung function disorders in farmers. *Thorax* 45, 919–923. <https://doi.org/10.1136/thx.45.12.919>
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (B)* 273, 593–610.
- Jiang, X., Wiedinmyer, C., Chen, F., Yang, Z.-L., Lo, J.C.-F., 2008. Predicted impacts of climate and land use change on surface ozone in the Houston, Texas, area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD009820>
- Jiang, Y., Deng, A., Bloszies, S., Huang, S., Zhang, W., 2017. Nonlinear response of soil ammonia emissions to fertilizer nitrogen. *Biol Fertil Soils* 53, 269–274. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1175-3>
- Kampa, M., Castanas, E., 2008. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution* 151, 362–367.
- KIM, H.H., 1992. Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing* 13, 2319–2336. <https://doi.org/10.1080/01431169208904271>
- Kramm, G., Dlugi, R., Dollard, G.J., Foken, T., Mölders, N., Müller, H., Seiler, W., Sievering, H., 1995. On the dry deposition of ozone and reactive nitrogen species. *Atmospheric Environment* 29, 3209–3231. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00218-N](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00218-N)
- Krupa, S.V., 2003. Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution* 124, 179–221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7)
- Laisk, A., Kull, O., Moldau, H., 1989. Ozone concentration in leaf intercellular air space is close to zero. *Plant Physiology* 90, 1163–1167.

- Lamaud, E., Loubet, B., Irvine, M., Stella, P., Personne, E., Cellier, P., 2009. Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1385–1396. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.017>
- Le Mentec, S., Stella, P., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Ngao, J., Améglio, T., Colin, J., Flick, D., Personne, E., 2022. Coupling the TEB and SurfAtm Models for Heat Flux Modelling in Urban Area: Comparison With Flux Measurements in Strasbourg (France). *Front. Environ. Sci.* 10, 856569. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.856569>
- Leistra, M., Wolters, A., 2004. Computations on the Volatilisation of the Fungicide Fenpropimorph from Plants in a Wind Tunnel. *Water, Air, & Soil Pollution* 157, 133–148. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000038883.86688.83>
- Lichiheb, N., 2019. Implementation of the effect of urease inhibitor on ammonia emissions following urea-based fertilizer application at a Zea mays field in central Illinois_ A study with SURFATM-NH3 model. *Agricultural and Forest Meteorology* 10.
- Lichiheb, N., BEDOS, C., Personne, E., Barriuso, E., 2015a. Synthèse des connaissances sur le transfert des pesticides vers l’atmosphère par volatilisation depuis les plantes [WWW Document]. <http://irevues.inist.fr/pollution-atmospherique>. <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.4732>
- Lichiheb, N., Bedos, C., Personne, E., Benoit, P., Bergheaud, V., Fanucci, O., Bouhleb, J., Barriuso, E., 2015b. Measuring Leaf Penetration and Volatilization of Chlorothalonil and Epoxiconazole Applied on Wheat Leaves in a Laboratory-Scale Experiment. *Journal of Environment Quality* 44, 1782. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.03.0165>
- Lichiheb, N., Personne, E., Bedos, C., Barriuso, E., 2014. Adaptation of a resistive model to pesticide volatilization from plants at the field scale: Comparison with a dataset. *Atmospheric Environment* 83, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.004>
- Lichiheb, N., Personne, E., Bedos, C., Van den Berg, F., Barriuso, E., 2016. Implementation of the effects of physicochemical properties on the foliar penetration of pesticides and its potential for estimating pesticide volatilization from plants. *Science of The Total Environment* 550, 1022–1031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.058>
- Lin, T.-P., Matzarakis, A., Hwang, R.-L., 2010. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment* 45, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.002>
- Lobaccaro, Acero, Martinez, Padro, Laburu, Fernandez, 2019. Effects of Orientations, Aspect Ratios, Pavement Materials and Vegetation Elements on Thermal Stress inside Typical Urban Canyons. *IJERPH* 16, 3574. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193574>
- Locke, A.M., Ort, D.R., 2014. Leaf hydraulic conductance declines in coordination with photosynthesis, transpiration and leaf water status as soybean leaves age regardless of soil moisture. *Journal of Experimental Botany* 65, 6617–6627. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru380>
- Loubet, B., Decuq, C., Personne, E., Massad, R.S., Flechard, C., Fanucci, O., Mascher, N., Gueudet, J.-C., Masson, S., Durand, B., Genermont, S., Fauvel, Y., Cellier, P., 2012. Investigating the stomatal, cuticular and soil ammonia fluxes over a growing critical crop under high acidic loads. *Biogeosciences* 9, 1537–1552. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1537-2012>
- Loubet, B., Générmont, S., Ferrara, R., Bedos, C., Decuq, C., Personne, E., Fanucci, O., Durand, B., Rana, G., Cellier, P., 2010. An inverse model to estimate ammonia emissions from fields. *European Journal of Soil Science* 61, 793–805. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01268.x>
- Majewski, M.S., Capel, P.D., 2019. *Pesticides in the Atmosphere: Distribution, Trends, and Governing Factors*. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780429062780>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., Bezirtzoglou, E., 2020. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health* 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Massad, R.-S., Nemitz, E., Sutton, M.A., 2010. Review and parameterisation of bi-directional ammonia exchange between vegetation and the atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 10359–10386. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10359-2010>

- Masson, V., 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Mattsson, M., Herrmann, B., David, M., Loubet, B., Riedo, M., Theobald, M.R., Sutton, M.A., Bruhn, D., Neftel, A., Schjoerring, J.K., 2009. Temporal variability in bioassays of the stomatal ammonia compensation point in relation to plant and soil nitrogen parameters in intensively managed grassland. *Biogeosciences* 6, 171–179. <https://doi.org/10.5194/bg-6-171-2009>
- Mattsson, M., Husted, S., Schjoerring, J.K., 1998. Influence of nitrogen nutrition and metabolism on ammonia volatilization in plants. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51.
- Menut, L., Bessagnet, B., Briant, R., Cholakian, A., Couvidat, F., Mailler, S., Pennel, R., Siour, G., Tuccella, P., Turquety, S., Valari, M., 2021. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model. *Geoscientific Model Development* 14, 6781–6811. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6781-2021>
- Meyers, T.P., Finkelstein, P., Clarke, J., Ellestad, T.G., Sims, P.F., 1998. A multilayer model for inferring dry deposition using standard meteorological measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 103, 22645–22661.
- Milford, C., Hargreaves, K.J., Sutton, M.A., Loubet, B., Cellier, P., 2001. Fluxes of NH₃ and CO₂ over upland moorland in the vicinity of agricultural land. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 106, 24169–24181.
- Milford, C., Theobald, M.R., Nemitz, E., Hargreaves, K.J., Horvath, L., Raso, J., Dammgen, U., Neftel, A., Jones, S.K., Hensen, A., Loubet, B., Cellier, P., Sutton, M.A., 2009. Ammonia fluxes in relation to cutting and fertilization of an intensively managed grassland derived from an inter-comparison of gradient measurements 16.
- Monteith, J.L., 1981. Evaporation and surface temperature: EVAPORATION and SURFACE TEMPERATURE. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 107, 1–27. <https://doi.org/10.1002/qj.49710745102>
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19, 205–234.
- Montes, C., Lhomme, J.-P., Demarty, J., Prévot, L., Jacob, F., 2014. A three-source SVAT modeling of evaporation: Application to the seasonal dynamics of a grassed vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 191, 64–80. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.004>
- Morán, M., Ferreira, J., Martins, H., Monteiro, A., Borrego, C., González, J.A., 2016. Ammonia agriculture emissions: From EMEP to a high resolution inventory. *Atmospheric Pollution Research* 7, 786–798. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.04.001>
- Musy, M., Malys, L., Morille, B., Inard, C., 2015. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Climate* 14, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.07.004>
- Nemitz, E., Sutton, M.A., Schjoerring, J.K., Husted, S., Paul Wyers, G., 2000. Resistance modelling of ammonia exchange over oilseed rape. *Agricultural and Forest Meteorology* 105, 405–425. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00206-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00206-9)
- Noilhan, J., Mahfouf, J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change* 13, 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7)
- Nuvolone, D., Petri, D., Voller, F., 2018. The effects of ozone on human health. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 8074–8088. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>
- Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)* 7, 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Pan, Y., Gu, M., He, Y., Wu, D., Liu, C., Song, L., Tian, S., Lü, X., Sun, Y., Song, T., Walters, W.W., Liu, X., Martin, N.A., Zhang, Q., Fang, Y., Ferracci, V., Wang, Y., 2020. Revisiting the Concentration Observations and Source Apportionment of Atmospheric Ammonia. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 933–938. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-2111-2>
- Personne, E., Loubet, B., Herrmann, B., Mattsson, M., Schjoerring, J.K., Nemitz, E., Sutton, M.A., Cellier, P., 2009. SURFATM-NH₃: a model combining the surface energy balance and bi-directional exchanges of ammonia applied at the field scale. *Biogeosciences* 6, 1371–1388. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1371-2009>

- Personne, E., Perrier, A., Tuzet, A., 2003. Simulating water uptake in the root zone with a microscopic-scale model of root extraction. *Agronomie* 23, 153–168. <https://doi.org/10.1051/agro:2002081>
- Personne, E., Tardy, F., Générmont, S., Decuq, C., Gueudet, J.-C., Mascher, N., Durand, B., Masson, S., Lauransot, M., Fléchar, C., Burkhardt, J., Loubet, B., 2015. Investigating sources and sinks for ammonia exchanges between the atmosphere and a wheat canopy following slurry application with trailing hose. *Agricultural and Forest Meteorology* 207, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.002>
- Pincetl, S., 2012. Nature, urban development and sustainability – What new elements are needed for a more comprehensive understanding? *Cities* 29, S32–S37. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.06.009>
- Pitman, A.J., 2003. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *Int. J. Climatol.* 23, 479–510. <https://doi.org/10.1002/joc.893>
- Pleijel, H., Broberg, M.C., Uddling, J., Mills, G., 2018. Current surface ozone concentrations significantly decrease wheat growth, yield and quality. *Science of The Total Environment* 613–614, 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.111>
- Pollution de l'air : le coût de l'inaction [WWW Document], n.d. URL <https://www.senat.fr/rap/r14-610-1/r14-610-1.html> (accessed 1.6.22).
- Pope, C.A.I., Ezzati, M., Dockery, D.W., 2009. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States [WWW Document]. <https://doi.org/10.1056/NEJMsa0805646>. <https://doi.org/10.1056/NEJMsa0805646>
- Priego, C., Breuste, J., Rojas, J., 2008. Perception and value of nature in urban landscapes: A comparative analysis of cities in Germany, Chile and Spain. *LO* 7, 1–22. <https://doi.org/10.3097/LO.200807>
- Prueger, J.H., Kustas, W.P., 2015. Aerodynamic Methods for Estimating Turbulent Fluxes, in: Hatfield, J.L., Baker, J.M. (Eds.), *Agronomy Monographs*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 407–436. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr47.c18>
- Redon, E., Lemonsu, A., Masson, V., 2020. An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geosci. Model Dev.* 13, 385–399. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-385-2020>
- Robichaud, A., 2020. An overview of selected emerging outdoor airborne pollutants and air quality issues: The need to reduce uncertainty about environmental and human impacts. *Journal of the Air & Waste Management Association* 70, 341–378. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1723738>
- Rouil, L., Honoré, C., Vautard, R., Beekmann, M., Bessagnet, B., Malherbe, L., Meleux, F., Dufour, A., Elichegaray, C., Flaud, J.-M., Menut, L., Martin, D., Peuch, A., Peuch, V.-H., Poisson, N., 2009. Prev'air: An Operational Forecasting and Mapping System for Air Quality in Europe. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 90, 73–84. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2390.1>
- Ryer-Powder, J.E., 1991. Health effects of ammonia. *Plant/Oper. Prog.* 10, 228–232. <https://doi.org/10.1002/prsb.720100411>
- Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., Clappier, A., 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theor Appl Climatol* 99, 331–344. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0142-9>
- Schiffman, S.S., Studwell, C.E., Landerman, L.R., Berman, K., Sundry, J.S., 2005. Symptomatic Effects of Exposure to Diluted Air Sampled from a Swine Confinement Atmosphere on Healthy Human Subjects. *Environmental Health Perspectives* 113, 567–576. <https://doi.org/10.1289/ehp.6814>
- Schjoerring, J.K., Husted, S., Mattsson, M., 1998. Physiological parameters controlling plant-atmosphere ammonia exchange. *Atmospheric Environment* 32, 491–498. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00006-X)
- Scholz, F.G., Bucci, S.J., Goldstein, G., 2014. Strong hydraulic segmentation and leaf senescence due to dehydration may trigger die-back in *Nothofagus dombeyi* under severe droughts: a comparison

- with the co-occurring *Austrocedrus chilensis*. *Trees* 28, 1475–1487. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1050-x>
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G.P.S., Handa, N., Kohli, S.K., Yadav, P., Bali, A.S., Parihar, R.D., Dar, O.I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., 2019. Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Appl. Sci.* 1, 1446. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1>
- Sintermann, J., Neftel, A., Ammann, C., Haeni, C., Hensen, A., Loubet, B., Flechard, C.R., 2012. Are ammonia emissions from field-applied slurry substantially over-estimated in European emission inventories? *Biogeosciences* 9, 1611–1632. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1611-2012>
- Spencer, W.F., Cliath, M.M., 1973. Pesticide Volatilization as Related to Water Loss From Soil. *Journal of Environmental Quality* 2, 284–289. <https://doi.org/10.2134/jeq1973.00472425000200020026x>
- Steiner, A.L., 2020. Role of the Terrestrial Biosphere in Atmospheric Chemistry and Climate. *Acc. Chem. Res.* 53, 1260–1268. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00116>
- Stella, P., Loubet, B., Lamaud, E., Laville, P., Cellier, P., 2011a. Ozone deposition onto bare soil: A new parameterisation. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 669–681. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.015>
- Stella, P., Personne, E., Lamaud, E., Loubet, B., Trebs, I., Cellier, P., 2013. Assessment of the total, stomatal, cuticular, and soil 2 year ozone budgets of an agricultural field with winter wheat and maize crops: STOMATAL AND NONSTOMATAL OZONE BUDGETS. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 118, 1120–1132. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20094>
- Stella, P., Personne, E., Loubet, B., Lamaud, E., Ceschia, E., Béziat, P., Bonnefond, J.M., Irvine, M., Keravec, P., Mascher, N., Cellier, P., 2011b. Predicting and partitioning ozone fluxes to maize crops from sowing to harvest: the Surf_{atm}-O₃ model. *Biogeosciences* 8, 2869–2886. <https://doi.org/10.5194/bg-8-2869-2011>
- Stock, D., Holloway, P.J., 1993. Possible mechanisms for surfactant-induced foliar uptake of agrochemicals. *Pesticide Science* 38, 165–177. <https://doi.org/10.1002/ps.2780380211>
- Sutton, M. A., Flower, D., Moncriefe, J.B., 1993. The exchange of atmospheric ammonia with vegetated surfaces. I: Unfertilized vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 119, 1023–1045. <https://doi.org/10.1002/qj.49711951309>
- Sutton, M.A., Milford, C., Nemitz, E., Theobald, M.R., Hill, P.W. et al, 2001. Biosphere-atmosphere interactions of ammonia with grasslands: experimental strategy and results from a new European initiative. *Plant and Soil* 228, 131–145.
- Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarter, W., 2011. Too much of a good thing. *Nature* 472, 159–161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
- Sutton, M.A., Pitcairn, C.E.R., Fowler, D., 1993. The exchange of ammonia between the atmosphere and plant communities. *Advances in Ecological Research* 24, 301–393.
- Tai, A.P.K., Val Martin, M., 2017. Impacts of ozone air pollution and temperature extremes on crop yields: Spatial variability, adaptation and implications for future food security. *Atmospheric Environment* 169, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.002>
- Tang, J., Schurgers, G., Rinnan, R., 2019. Process Understanding of Soil BVOC Fluxes in Natural Ecosystems: A Review. *Rev. Geophys.* 57, 966–986. <https://doi.org/10.1029/2018RG000634>
- Tang, Y.S., Cape, J.N., Sutton, M.A., 2001. Development and Types of Passive Samplers for Monitoring Atmospheric NO₂ and NH₃ Concentrations. *The Scientific World JOURNAL* 1, 513–529. <https://doi.org/10.1100/tsw.2001.82>
- Taylor, M., Lyons, S.M., Davie-Martin, C.L., Geoghegan, T.S., Hageman, K.J., 2019. Understanding Trends in Pesticide Volatilization from Agricultural Fields Using the Pesticide Loss via Volatilization Model. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04762>
- Teyssie, R., Manangama, G., Baldi, I., Carles, C., Brochard, P., Bedos, C., Delva, F., 2020. Assessment of residential exposures to agricultural pesticides: A scoping review. *PLoS ONE* 15, e0232258. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232258>
- Toujours plus d'habitants dans les unités urbaines - Insee Focus - 210 [WWW Document], n.d. URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806684> (accessed 12.16.21).

- Tuovinen, J.-P., Ashmore, M.R., Emberson, L.D., Simpson, D., 2004. Testing and improving the EMEP ozone deposition module. *Atmospheric Environment* 38, 2373–2385. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.026>
- Tuzet, A., Perrier, A., Loubet, B., Cellier, P., 2011. Modelling ozone deposition fluxes: The relative roles of deposition and detoxification processes. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 480–492. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.004>
- Tuzet, A., Rahantaniaina, M.-S., Noctor, G., 2019. Analyzing the Function of Catalase and the Ascorbate–Glutathione Pathway in H₂O₂ Processing: Insights from an Experimentally Constrained Kinetic Model. *Antioxidants & Redox Signaling* 30, 1238–1268. <https://doi.org/10.1089/ars.2018.7601>
- Twigg, M.M., Chatterjee, D., Decuq, C., Jones, M., Cowan, N., Drewer, J., Loubet, B., Personne, E., Fortineau, A., Varunesh, C., Singh, R., Meena, P., Pathak, H., Sutton, M.A., 2019. Investigation of NH₃ Fluxes over a Flooded Rice Paddy in India. *AGU Fall Meeting Abstracts* 43.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. World urbanization prospects: the 2018 revision.
- Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Coheur, P.-F., 2018. Industrial and agricultural ammonia point sources exposed. *Nature* 564, 99–103. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0747-1>
- Van den Honert, T., 1948. Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society* 3, 146–153.
- Vautard, R., Beekmann, M., Roux, J., Gombert, D., 2001. Validation of a hybrid forecasting system for the ozone concentrations over the Paris area. *Atmospheric Environment* 35, 2449–2461. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00466-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00466-0)
- Velthof, G.L., van Bruggen, C., Groenestein, C.M., de Haan, B.J., Hoogeveen, M.W., Huijsmans, J.F.M., 2012. A model for inventory of ammonia emissions from agriculture in the Netherlands. *Atmospheric Environment* 46, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.075>
- Viovy, N., 1996. Interannuality and CO₂ sensitivity of the SECHIBA-BGC coupled SVAT-BGC model. *Physics and Chemistry of the Earth* 21, 489–497. [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(97\)81147-0](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(97)81147-0)
- Vohra, K., Vodonos, A., Schwartz, J., Marais, E.A., Sulprizio, M.P., Mickley, L.J., 2021. Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem. *Environmental Research* 195, 110754. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754>
- Voltz, M., Bedos, C., Crevoisier, D., Fabre, J.-C., Loubet, B., Chataignier, M., Bankwal, P., Barriuso, E., Benoit, P., Brunet, Y., Casellas, E., Chabrier, P., Chambon, C., Dagès, C., Douzals, J.P., Drouet, J.-L., Lafolie, F., Mamy, L., Moitrier, N., Personne, E., Pot, V., Raynal, H., Ruelle, B., Samouëlian, A., Saudreau, M., 2019. Modélisation Intégrée du devenir des Pesticides dans les Paysages agricoles (projet MIPP). Presented at the 49e Congrès Groupe Français de recherche sur les Pesticides.
- Wang, D., Hinckley, T.M., Cumming, A.B., Braatne, J., 1995. A comparison of measured and modeled ozone uptake into plant leaves. *Environmental Pollution* 89, 247–254. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00078-R](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00078-R)
- Wentworth, G.R., Murphy, J.G., Benedict, K.B., Bangs, E.J., Collett Jr., J.L., 2016. The role of dew as a night-time reservoir and morning source for atmospheric ammonia. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 7435–7449. <https://doi.org/10.5194/acp-16-7435-2016>
- Wesely, M.L., Hicks, B.B., 1977. Some Factors that Affect the Deposition Rates of Sulfur Dioxide and Similar Gases on Vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association* 27, 1110–1116. <https://doi.org/10.1080/00022470.1977.10470534>
- World Health Organization, 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary. World Health Organization, Geneva.
- World Health Organization. Regional Office for Europe, 2000. Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. ed, WHO Regional Publications, European Series; 91. World Health Organization. Regional Office for Europe, Copenhagen.

- Wu, Z., Schwede, D.B., Vet, R., Walker, J.T., Shaw, M., Staebler, R., Zhang, L., 2018. Evaluation and Intercomparison of Five North American Dry Deposition Algorithms at a Mixed Forest Site. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 10, 1571–1586. <https://doi.org/10.1029/2017MS001231>
- Xue, Y., Sellers, P.J., Kinter, J.L., 1991. A Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies. *JOURNAL OF CLIMATE* 4, 21.

