

## Résumé du projet de thèse

<b>Titre de la thèse</b>	Evaluation micrométéorologique de l'émission et de la dispersion de l' $\text{NH}_3$ atmosphérique au voisinage des sources fixes dans un paysage agricole.
<p>L'ammoniac atmosphérique (<math>\text{NH}_3</math>) est émis en grande partie (~2/3) par les sources agricoles fixes (bâtiments d'élevage et stockage d'effluents), et représente les 3/4 des émissions totales d'azote réactif dans l'air. Cette thèse a pour but de contribuer à la réduction des incertitudes concernant les émissions et le devenir (dispersion et dépôt) d'<math>\text{NH}_3</math> dans l'environnement immédiat des sources fixes (<math>10^2</math>-<math>10^3</math> m) et à l'échelle du paysage. Une question centrale concerne le rôle que jouent les structures de la mosaïque paysagère aux abords des sources fixes (végétation, rugosité) sur la dispersion et la durée de vie atmosphérique de l'<math>\text{NH}_3</math> émis dans le paysage, sur son dépôt local, sur le rapport émission/dépôt à l'échelle du petit territoire. Les objectifs de cette thèse sont i) de développer une plate-forme automobile innovante de mesure à haute fréquence (QCL-CRDS) des concentrations d'<math>\text{NH}_3</math> à l'échelle du paysage ; ii) d'inférer la force de source en <math>\text{NH}_3</math> de bâtiments d'exploitation par la mesure de panaches associée à la modélisation inverse ; et iii) de caractériser la dispersion et l'échange de l'<math>\text{NH}_3</math> sur les écosystèmes au voisinage des sources et à l'échelle d'un petit territoire, en utilisant les données acquises à cette échelle pour contraindre, paramétrer, vérifier un modèle couplé de dispersion-dépôt, en cours de développement à l'INRA (FIDES-3D/SURFATM).</p>	

## Description du projet

<b>Enjeux socio-économiques et scientifiques</b>
<p>L'ammoniac (<math>\text{NH}_3</math>) est de loin la première des molécules d'azote réactif (<math>\text{N}_r</math>) atmosphérique d'origine agricole au vu des quantités émises (77% des émissions agricoles françaises de <math>\text{N}_r</math>, contre 14% pour <math>\text{N}_2\text{O}</math> et 8% pour <math>\text{NO}_x</math>) et, en tant que précurseur de nombreux effets de la cascade de l'azote, a des impacts environnementaux majeurs. Les dépôts secs et humides de <math>\text{NH}_x</math> sur les écosystèmes peuvent localement s'élever à plusieurs dizaines de <math>\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}</math>, occasionnant acidification, eutrophisation, perte de biodiversité, et émissions indirectes de <math>\text{N}_2\text{O}</math>.</p> <p>Les bâtiments d'élevage et le stockage des déjections contribuent de l'ordre de 2/3 des émissions européennes d'<math>\text{NH}_3</math>, et l'épandage des effluents au champ de l'ordre de 1/3 (CORPEN, 2001; Sintermann et al., 2012;). Les émissions sont en fait très variables, tant au niveau du siège d'exploitation qu'au champ, et les facteurs d'émission utilisés dans les inventaires sont très incertains, proviennent en grande partie de pays d'Europe du Nord, et sont potentiellement biaisés du fait des méthodologies de mesure employées.</p> <p>Bien que longtemps cantonnée à un domaine de recherche scientifique très étroit en France, la préoccupation ammoniacale est croissante au niveau national, motivée en particulier par le rôle du <math>\text{NH}_3</math> dans la formation d'aérosols fins (PM 2.5) et par la négociation des accords internationaux de pollution transfrontalière (protocole de Göteborg). Certains plans régionaux sur la qualité de l'air, tel le PRQA de la Bretagne, affichent une volonté de développer les mesures par le biais de campagnes ponctuelles.</p> <p>L'<math>\text{NH}_3</math> atmosphérique se positionne thématiquement à l'interface de 3 Départements de l'INRA : Environnement et Agronomie (EA), Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques (EFPA), et Physiologie Animale et Systèmes d'Elevage (PHASE) ; l'<math>\text{NH}_3</math> est émis majoritairement par les systèmes d'élevage et de culture, alors que les puits principaux de <math>\text{N}_r</math> dans les paysages sont les écosystèmes non-fertilisés (forêts, landes, zones humides, mais aussi les agrosystèmes hors saison de croissance). Le bouclage du cycle de l'azote à l'échelle du paysage nécessite une meilleure compréhension et quantification des émissions, transferts et dépôts atmosphériques de</p>

NH<sub>3</sub>. Ceci est d'autant plus vrai que l'NH<sub>3</sub> a une durée de vie atmosphérique assez courte et peut se re-déposer en grande partie dans les premiers km ou dizaines de km en aval des sources.

L'enjeu principal de cette thèse est de contribuer à la réduction des incertitudes à la fois sur les émissions d'NH<sub>3</sub> par les sources fixes (bâtiments d'élevage) et sur la dispersion du panache d'émission à courte échelle (10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> m) dans la mosaïque paysagère. Ce travail mobilisera des techniques de l'état de l'art, tant en terme de mesure en haute fréquence et 3-D des concentrations d'NH<sub>3</sub> dans le paysage, qu'en terme de modélisation de la dispersion atmosphérique et évaluation des sources par modélisation inverse.

### Situation du projet et état de l'art scientifique – Originalité du projet

La thèse se propose i) d'aborder la question de la provenance et du devenir de l'NH<sub>3</sub> dans un paysage agricole à forte densité d'élevage, ii) de contribuer au paramétrage, test et validation de modèles de dispersion/dépôt d'NH<sub>3</sub> à l'échelle du paysage, et iii) de contribuer aux développements météorologiques sur les émissions par les sources fixes, en cours à l'INRA, dans les instituts techniques et autres partenaires internationaux (Robin et al., 2010).

Le projet se situe par conséquent à l'interface entre l'étude des sources agricoles de NH<sub>3</sub> (quantification des forces de source, estimation de facteurs d'émission, inventaires spatialisés) et la thématique des dépôts sur – ou échanges avec – les surfaces terrestres en aval des sources (interactions avec les agro-éco-systèmes, transformations biogéochimiques, cascade de l'azote). La source d'NH<sub>3</sub> ne sera pas considérée isolément, mais comme un élément d'une mosaïque paysagère dont la structure et les aménagements (e.g. rugosité, haies, ceintures arborées) peuvent moduler les impacts.

Les sources d'NH<sub>3</sub> dans un paysage agricole sont paradoxalement immédiatement identifiables (bâtiments d'élevage, stockage, épandages) mais difficilement quantifiables. Cela tient en premier lieu aux incertitudes sur les volumes d'activités de productions animales (e.g. types et effectifs d'animaux, classes d'âge) et sur les types de systèmes et de bâtiments d'élevage (e.g. ventilation naturelle vs mécanique, conduite de la litière, des effluents) ; les données d'activité sont souvent impossibles à obtenir à une fine résolution spatiale à l'échelle du paysage. La difficulté à quantifier les sources réside aussi dans les incertitudes et la variabilité des facteurs d'émission pour les différentes classes d'activité.

Les méthodes utilisées classiquement pour la mesure des émissions par les sources fixes dépendent largement du type de renouvellement d'air dans le bâtiment (mesure directe de débit dans le cas d'une ventilation mécanique, vs méthodes micrométéorologiques ou technologies de traceur pour les bâtiments avec ventilation naturelle). Toutes les techniques devraient en principe donner des résultats similaires et cohérents avec les principes de base de conservation de masse et d'énergie. En pratique, l'usage des techniques est difficile quand les animaux peuvent boire et manger à l'extérieur du bâtiment, tout en déféquant à l'intérieur. En outre, les concentrations d'NH<sub>3</sub> sont souvent hétérogènes surtout dans le cas de grands bâtiments (Robin et al., 2010).

En complément des techniques classiques, la méthode des panaches d'émission permet d'estimer les émissions d'un bâtiment isolé, ou bien d'un groupe de bâtiments, ou de tout le siège d'exploitation, par des mesures de concentration à faible distance sous le vent des sources, associées à l'inversion d'un modèle de dispersion (Hensen et al, 2009). Le choix du modèle (Gaussien, Lagrangien, Eulerien) est fonction notamment du vent, de la topographie du site et de la distance aux sources. La modélisation inverse associée à la mesure de panaches constitue une approche prometteuse de type « top-down », par opposition aux mesures classiques « bottom-up » réalisées in situ dans les bâtiments, mais est rarement utilisée car elle nécessite le déploiement d'un système d'échantillonnage-analyse de l'NH<sub>3</sub> mobile dans le paysage, associé à une haute fréquence et haute précision de mesure de l'NH<sub>3</sub>.

Ce projet de thèse propose, au travers de la mise au point d'une telle plate-forme automobile de mesure de l'NH<sub>3</sub> atmosphérique, d'étudier la dispersion de l'NH<sub>3</sub> issu des sources fixes à l'échelle du paysage en vue d'en inférer la force de source. Les mesures de concentration en 2-D dans le paysage, réalisées à haute fréquence (1 seconde) au moyen d'un analyseur QCL-CRDS (quantum cascade laser - cavity ringdown spectroscopy, en cours d'acquisition ; cf Leen et al., 2013), et associées à un géoréférencement par GPS et à des mesures de turbulence, permettront à la fois de tester, paramétrer et vérifier un modèle de dispersion-dépôt à l'échelle du paysage (e.g. FIDES; Loubet et al., 2001), et dans certaines conditions, d'inférer la force de source de bâtiments d'élevage (mode inverse) pour confronter aux mesures classiques d'émission in-situ.

La valeur ajoutée de ce projet est i) de confronter des mesures d'émissions in situ à des approches par modélisation inverse, et ii) de tirer profit d'un analyseur à haute fréquence temporelle pour étayer le développement d'un modèle de dispersion-dépôt à l'échelle du paysage, par cartographie du NH<sub>3</sub> dans un paysage à l'échelle de l'heure (les approches classiques utilisent des capteurs d'NH<sub>3</sub> passifs avec une résolution mensuelle et une faible résolution spatiale).

### Questions de recherche proposées au candidat

Quels rôles peuvent jouer l'environnement immédiat et les structures paysagères aux abords des sources fixes (par ex. haies bocagères, ou ceintures arborées près des bâtiments) sur la dispersion et la durée de vie atmosphérique de l' $\text{NH}_3$  émis dans le paysage, sur son dépôt local, sur le rapport émission/dépôt à l'échelle du petit territoire ?

Dans quelle limite une cartographie des concentrations en  $\text{NH}_3$  à l'échelle du paysage, obtenue par une plate-forme mobile de mesure, peut-elle aider à la vérification d'un modèle de dispersion-dépôt ?

Quel est le potentiel des techniques de modélisation inverse, associées aux mesures de panaches de dispersion, pour estimer la force de source en  $\text{NH}_3$  de bâtiments d'élevage isolés ou de sièges d'exploitation ? Quelles en sont les conditions d'applicabilité, les contraintes, les principales sources d'incertitudes ?

### Hypothèses de travail

L'ammoniac issu des sources agricoles est émis en général à faible hauteur (<5m) et a une forte solubilité dans l'eau et/ou affinité physico-chimique avec les surfaces environnementales (sol, végétation, eau libre en surface) ; ces deux facteurs conduisent à un fort dépôt sec à proximité des sources (dans le ou les premiers km). La rugosité des surfaces et la turbulence (ou stabilité) atmosphérique contrôlent l'amplitude de la dispersion horizontale et verticale. Les conditions météorologiques modulent la force d'émission de certains systèmes d'élevage, d'autres en sont plus ou moins indépendants. Les dépôts secs sur les écosystèmes dépendent également de la météorologie, mais aussi des teneurs en azote dans les agro-écosystèmes.

Les concentrations en  $\text{NH}_3$  en différents endroits du paysage sont la résultante d'une combinaison complexe de tous ces processus, et leur observation spatialisée doit permettre une vérification indirecte des modèles mécanistes d'émission-transport-dépôt. Certains modèles de dispersion de gaz dans l'atmosphère ne prennent pas en compte les interactions du panache d'émission avec la surface (dépôt sec, ou émission), et partent de l'hypothèse selon laquelle l'erreur induite (par cette non prise en charge de la surface) sur les concentrations ou forces de sources modélisées, est faible. D'autres modèles à l'état de l'art (e.g. FIDES, Loubet et al., 2001) ont couplé la dispersion avec un module d'échange bi-directionnel de surface (e.g. SURFATM, Personne et al., 2009) pour rendre compte de ces effets, considérés comme importants pour l' $\text{NH}_3$ . Il est certainement nécessaire de prendre compte ces dépôts locaux dans les modèles inverses servant à inférer les sources à partir de mesure de concentration faites à proximité de celles-ci.

### Matériel nécessaire (disponible et/ou à produire), et méthodes envisagées

Les concentrations atmosphériques en  $\text{NH}_3$  seront mesurées par un instrument spectroscopique (QCL-CRDS Los Gatos Research, acquisition début 2014) avec une précision de l'ordre de 0.2 ppb pour un temps d'intégration de l'ordre de 1 s. L'instrument sera embarqué à bord d'un véhicule instrumenté de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, équipé d'un générateur électrique. Une pompe à air à 4 têtes assurera un fort débit d'échantillonnage (50-100l/min). La position du véhicule dans le paysage sera enregistrée en continu par GPS. L'acquisition spatiale de données de concentrations se fera sous forme de campagnes de mesure de typiquement une journée, parcourant les routes et chemins d'un petit paysage agricole (de l'ordre de 10 km<sup>2</sup>) dans une durée de l'ordre de 1-2 heures.

### Programme de recherches

Le travail sera structuré en trois axes:

- 1- **Développement de la méthode d'évaluation de la force de source par mesure de panache par QCL-CRDS embarqué et modélisation inverse.** La méthode sera testée en conditions favorables (autour de quelques bâtiments isolés, dont les caractéristiques physiques et zootechniques seront bien connues), et dans lesquels seront réalisées en parallèle des mesures d'émissions in situ (techniques de bilans de masse, mesure directe de débit, ou traceurs). Plusieurs modèles inverses seront testés (e.g. Gaussien, FIDES-2D, Windtrax).
- 2- **Campagnes ponctuelles de mesure et de cartographie de l' $\text{NH}_3$**  dans un petit paysage agricole de l'ORE AGRHYS (Kervidy-Naizin). Une vingtaine de journées ou demi-journées de mesures sont prévues sur une durée de deux ans pour caractériser les variations temporelles de la dynamique spatiale de l' $\text{NH}_3$ . La dimension verticale de la diffusion sera testée ponctuellement en déployant un mât télescopique à proximité des sources. Le flux d'échange d' $\text{NH}_3$  de surface sera mesuré sur des agro-écosystèmes en conditions de fond.
- 3- **Modélisation des émissions et de la dispersion de l' $\text{NH}_3$  à l'échelle du paysage** de Kervidy-Naizin, au moyen de la version paysage (3-D) du modèle couplé FIDES-

SURFATM. Ce paysage fait l'objet depuis plusieurs années de projets (FP6 NitroEurope-IP, ANR ESCAPADE) autour de la cascade de l'azote à l'échelle du petit territoire, de campagnes de mesures, de questionnaires d'exploitations, d'inventaires de pratiques et d'activités agricoles. Le site est par conséquent bien renseigné concernant les sources fixes d' $\text{NH}_3$  et se prête bien à l'application et à la vérification du modèle atmosphérique, dans le cadre plus général du modèle intégré (hydrologie/agro-écosystèmes/exploitations/atmosphère). Le travail de thèse contribuera à l'évaluation et à l'amélioration du modèle FIDES-SURFATM, développé en parallèle à l'UMR EGC.

### Calendrier

Mois 1-6 : Bibliographie sur  $\text{NH}_3$ , spectroscopie IR / QCL, modélisation inverse; prise en main de l'instrument QCL-CRDS; développement de la plate-forme mobile de mesure ; tests sur le site « pâturage » du projet CORTEA-BTéP (Le Rheu, 35).

Mois 7-18 : Tests de la méthode de modélisation inverse sur bâtiments d'élevage ; début de la série de 20 campagnes de mesure à Kervidy-Naizin (rythme mensuel).

Mois 12-24 : Prise en main du modèle FIDES-3D/SURFATM à l'échelle paysage. Visite à ECN et RIVM (Pays-Bas) pour intercomparaisons avec les plate-formes mobiles néerlandaises.

Mois 24 : soumission article 1.

Mois 25-30 : Fin de la série de campagnes de mesure à Kervidy-Naizin. Analyse et synthèse des résultats : modélisation échelle paysage ; analyses de sensibilité ; paramétrage des modèles.

Mois 33 : soumission article 2.

Mois 31-36 : Rédaction de la thèse.

### Publications envisageables

Article 1. Emissions d' $\text{NH}_3$  par les bâtiments d'élevage : comparaison des méthodes de mesure in situ et par panache/modélisation inverse. Etudes de cas sur bâtiments contrastés : ventilation dynamique (porcins ou avicole) vs naturelle (bovins).

Article 2. Emission et dispersion de l' $\text{NH}_3$  à l'échelle du paysage : paramétrage et vérification d'un modèle par mesures spatialisées à haute fréquence.

### Compétences cognitives et techniques acquises par le doctorant

Acquisition de méthodes de mesure des concentrations et flux de  $\text{NH}_3$ , plus spécifiquement appliquées à la validation de modèles à l'échelle du paysage.

Appropriation des thématiques de dispersion et d'échanges gazeux dans le continuum bâtiments-atmosphère-mosaïque paysagère et développement de modèles mécanistes.

Gestion de projet : mener expérimentation et modélisation en parallèle, coordination des activités de mesures à l'interface entre projets de recherche, valorisation des résultats par des publications.

### Partenariat scientifique et industriel dans lequel s'inscrit le travail

A l'UMR SAS, le projet s'inscrit à l'interface entre la modélisation intégrée de la cascade de l'azote dans les paysages (Patrick Durand, Ophélie Fovet) et la thématique des émissions d' $\text{NH}_3$  par les bâtiments d'élevage (Melynda Hassouna, Paul Robin), au travers des mots-clé : modélisation, métrologie, sources, puits, transferts, spatialisation, incertitudes.

Le projet sera mené en étroite collaboration avec l'UMR EGC au travers notamment de la direction de thèse par Benjamin Loubet et des modèles FIDES-2D/3D et SURFATM, développés à EGC. Ce partenariat sera renforcé par les échanges au sein du projet ANR ESCAPADE (2012-2016), piloté par EGC (Jean-Louis Drouet), dans lequel le développement du modèle FIDES-3D/SURFATM et son couplage à NITROSCAPE et Casimod'N s'appuieront sur des mesures réalisées (entre autres) à Kervidy-Naizin. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la continuité des collaborations en cours entre SAS et EGC.

La thèse sera également en interaction avec le projet ADEME CORTEA-BTéP (Emissions d' $\text{NH}_3$  dans le continuum bâtiment-stockage-épandage-pâturage, 2013-2016, piloté par E. Lorinquer, IDELE), notamment avec le déploiement et test de l'appareil QCL-CRDS pour la mesure des flux sur le site de prairie (2014-2015), et inter-comparaison avec l'appareil ROSAA développé à EGC.

A l'international, une collaboration est envisagée avec Arjan Hensen d'ECN (Petten, NL), qui est un des leaders européens dans la technique de mesure embarquée des panaches et de modélisation inverse de la force de source en  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , et  $\text{N}_2\text{O}$  pour différents types de sources.

### Références bibliographiques

CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENVironnement) (2001). Les

émissions d'ammoniac d'origine agricole dans l'atmosphère. Etat des connaissances et perspectives de réduction des émissions. Ministères de l'Agriculture et de la Pêche, et de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris, juin 2001.

Hensen, A., Loubet, B., Mosquera, J., van den Bulk, W.C.M., Erisman, J.W., Dämmgen, U., Milford, C., Löpmeier, F.J., Cellier, P., Mikuska, P., and Sutton, M.A. (2009). Estimation of NH<sub>3</sub> emissions from a naturally ventilated livestock farm using local-scale atmospheric dispersion modelling, *Biogeosciences*, 6, 2847–2860, doi:10.5194/bg-6-2847-2009.

Leen, J.B., Yu, X.-Y., Gupta, M., Baer, D.S., Hubbe, J.M., Kluze, C.D., Tomlinson, J.M. and Hubbell, M.R. (2013). Fast In Situ Airborne Measurement of Ammonia Using a Mid-Infrared Off-Axis ICOS Spectrometer. *Environmental Science and Technology* (in press).

Loubet, B., Milford, C., Sutton, M. A., and Cellier, P. (2001): Investigation of the interaction between sources and sinks of atmospheric ammonia in an upland landscape using a simplified dispersion-exchange model, *J. Geophys. Res.*, 106, 24183–24195.

Personne, E., Loubet, B., Herrmann, B., Mattsson, M., Schjoerring, J.K., Nemitz, E., Sutton, M.A., and Cellier, P.: SURFATM-NH<sub>3</sub> (2009). A model combining the surface energy balance and bi-directional exchanges of ammonia applied at the field scale, *Biogeosciences*, 6, 1371–1388, doi:10.5194/bg-6-1371-2009.

Robin, P., G. Amand, C. Aubert, N. Babela, A. Brachet, D. Berckmans, C. Burton, B. Canart, P. Cellier, J.B. Dollé, H.M. Dong, M. Durif, A. Ehlacher, S. Eren Özcan, S. Espagnol, F. Gautier, N. Guingand, F. Guiziou, E. Hartung, M. Hassouna, P. Landrain, I.B. Lee, C. Leleu, Y.S. Li, X.D. Liao, B. Loubet, L. Loyon, Luth, B. Nicks, P.A.V. de Oliveira, P. Ponchant, W. Powers, Y., Ramonet, S.G. Sommer, J. Thiard, K.Y. Wang, H. Xin, A. Youssef (2010). Procédure de référence pour la mesure des émissions de polluants gazeux des bâtiments d'élevage et stockages d'effluents d'élevage. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME, Angers.

Sintermann, J., Neftel, A., Ammann, C., Hani, C., Hensen, A., Loubet, B., and Flechard, C.R. (2012). Are ammonia emissions from field-applied slurry substantially over-estimated in European emission inventories? *Biogeosciences* 9 (5): 1611-1632 <http://dx.doi.org/10.5194/bg-9-1611-2012>.

## Encadrement

<b>Responsable(s) de la thèse</b>	Chris Flechard, INRA, Rennes	<b>HDR ? (O/N)</b>	N
<b>Directeur(s) de la thèse (si différent du(des) responsable(s))</b>	Benjamin Loubet, INRA, Grignon	<b>HDR ? (O/N)</b>	O

### Liste de 5 publications récentes du (des) responsable(s) de la thèse, en rapport avec le projet proposé

- Flechard, C.R.**, Massad, R.-S., **Loubet, B.**, Personne, E., Simpson, D., Bash, J.O., Cooter, E.J., Nemitz, E. and Sutton, M.A. (2013). Advances in understanding, models and parameterisations of biosphere-atmosphere ammonia exchange, *Biogeosciences* 10, 5183–5225, <http://www.biogeosciences.net/10/5183/2013/bg-10-5183-2013.html>.
- Sutton, M.A.; 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.; Skjoth, C.A.; Geels, C.; Hertel, O.; Wichink Kruit, R.J.; Pinder, R.W.; Bash, J.O.; Walker, J.T.; Simpson, D.; Horvath, L.; Misselbrook, T.H.; Bleeker, A.; Dentener, F.; de Vries, W. (2013). Towards a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 368 (1621) 10.1098/rstb.2013.0166.
- Brümmer, C.; Marx, O.; Kutsch, W.; Ammann, C.; Wolff, V.; **Flechard, C.R.**; Freibauer, A. (2013). Fluxes of total reactive atmospheric nitrogen ( $\Sigma\text{Nr}$ ) using eddy covariance above arable land. *Tellus Ser. B-Chem. Phys. Meteorol.* 65 (0) 10.3402/tellusb.v65i0.19770.
- Loubet, B.**; Decuq, C.; Personne, E.; Massad, R.S.; **Flechard, C.**; Fanucci, O.; Mascher, N.; Guedet, J.C.; Masson, S.; Durand, B.; Genermont, 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/10.5194/bg-9-1537-2012>.
- Sintermann, J.; Neftel, A.; Ammann, C.; Hani, 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 (5): 1611-1632, <http://dx.doi.org/10.5194/bg-9-1611-2012>.