

Quantification des émissions d'ammoniac suite à l'épandage de produits résiduels organiques et d'engrais minéraux au champ – 1^{ère} synthèse des résultats acquis dans le cadre du projet CASDAR VOLAT'NH₃

Cohan J.P.¹, Charpiot A.², Morvan T.³, Eveillard P.⁴, Trochard R.¹, Champolivier L.⁵, De Chezelles E.⁶, Heurtaux M.⁶, Lorinquer E.², Espagnol S.⁷, Générmont S.⁸, Loubet B.⁸

1 ARVALIS-Institut du végétal, Station expérimentale de La Jaillière, 44370 La Chapelle St Sauveur, France;

2 IDELE, Monvoisin- BP 85225, 35652 Le Rheu Cedex, France;

3 INRA UMR1069 Soil Agro and hydroSystems, 65 rue de Saint Brieuc, CS 84215, F-35042 Rennes Cedex 1, France

4 UNIFA, Le diamant A, 92909 Paris La Défense, France;

5 CETIOM, BP 52627, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France;

6 ACTA, 149 rue de Bercy, 75595 PARIS Cedex 12, France;

7 IFIP, La Motte au Vicomte, BP 35104, 35651 Le Rheu Cedex

8 INRA, UMR INRA-AgroParisTech, 1091 Environnement et Grandes Cultures, F-78850 Thiverval-Grignon, France

Introduction

Les émissions d'azote ammoniacal dans l'atmosphère suite à un apport azoté sous forme de produit organique ou minéral sont essentielles à prendre en compte à la fois pour des raisons agronomiques et pour des raisons d'impact environnemental. En premier lieu, les pertes par volatilisation ammoniacale sont une cause majeure de perte d'efficacité des apports azotés sur les cultures (Meynard et al. 1997, COMIFER 2013). La recherche de la maximisation de l'efficacité des apports d'azote sous pression du contexte économique implique donc de mettre au point et d'employer les techniques agronomiques adaptées (Cohan et al. 2011). En second lieu, l'ammoniac est un précurseur atmosphérique de particules néfastes pour la santé humaine (Faburé et al. 2011). Pour cette raison, les niveaux d'émissions en France sont réglementés. 98% des émissions d'ammoniac étant attribuables à l'agriculture (CITEPA 2012), le respect des objectifs en matière de qualité de l'air implique le développement de mesures efficaces de réduction des émissions agricoles, notamment au champ. La recherche de solutions techniques innovantes nécessite de disposer de méthodes de mesures des émissions applicables à grande échelle sur le terrain. Or, les techniques actuellement disponibles pour mesurer les émissions d'ammoniac au champ (tunnel de ventilation, méthodes micro-météorologiques, suivi d'azote marqué...) impliquent toutes des contraintes techniques ou des limites méthodologiques ne permettant pas le déploiement d'un large réseau d'acquisition de références. Bien qu'elles aient servi à obtenir plusieurs résultats scientifiques riches d'enseignements, ces méthodes restent réservées à quelques études opérées par des équipes de recherches sur des sites expérimentaux lourdement équipés.

L'objectif de cette communication est de présenter une première synthèse des résultats obtenus pendant les 3 ans du projet CASDAR VOLAT'NH₃ (soutenu financièrement par le compte d'affectation spéciale «développement agricole et rural» du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt). Le projet avait un double objectif :

- Mettre au point une méthode simple d'estimation des émissions d'ammoniac au champ
- Employer cette technique pour étudier sur un réseau expérimental au champ les émissions d'ammoniac suite à l'épandage de produits résiduels organiques selon différentes techniques d'application sur sol nu, et suite à l'épandage d'engrais minéral azoté sous différentes formes sur cultures de céréales à paille et de colza. Il était notamment prévu d'avoir un aperçu de la variabilité des émissions en fonction des techniques employées, du site d'essai et des conditions climatiques spécifiques des expérimentations. Le réseau expérimental a donc eu un double rôle : support terrain pour la mise au point de la méthode et 1^{ère} tentative d'acquisition de références multilocales sur quelques pratiques culturales connues par ailleurs pour avoir un effet sur les émissions d'ammoniac au champ.

Matériels et méthodes

1. Caractéristiques des expérimentations

Seize sites d'essais ont été retenus comme support du réseau d'acquisition de référence au cours des printemps 2011 et 2012. Les caractéristiques de sol sont détaillées dans le tableau 1. Les modalités étudiées sur chacun d'eux sont détaillées dans les tableaux 2 (pour les essais étudiant l'épandage de produits résiduels organiques sur sol nu travaillé avant apport) et 3 (pour les essais étudiant l'épandage d'engrais

minéraux sur cultures). Les dispositifs étaient constitués de parcelles élémentaires de 400 m² minimum, répétée deux fois selon un plan d'expérience en blocs randomisés. Les données météorologiques étaient acquises sur les sites d'essais pour les données de vent (acquisition de la direction et de la vitesse semi-horaires par un poste CAMPBELL[®] CR800 – Gill WindSonic), et sur la station météorologique la plus proche du réseau METEO-France ou privé pour les autres données (relevés horaires des température, pluie, rayonnement global et humidité de l'air). Un résumé des principales données météorologiques acquises durant les essais est fourni en annexe. Chaque modalité a fait l'objet d'un suivi des émissions d'ammoniac au cours du temps à la suite des épandages (cf. Matériels et méthodes – 2). De plus, les stocks d'azote minéral du sol et la quantité d'azote contenus dans les parties aériennes des végétaux ont été mesurés en début et fin d'expérimentations pour chacune des modalités (données non présentées dans cette communication).

Tableau 1 : caractéristiques de sol des sites d'essai.

Site		Caractéristiques du sol (0-25 cm)					
Année	Lieu-organisme	Nom vernaculaire	Limon (g.kg ⁻¹)	Argile* (g.kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g.kg ⁻¹)	Corg. (g.kg ⁻¹)	pH eau
2011	La Jaillière (44) – ARVALIS	Limon argileux sur schistes	512	189	0	13.7	6.2
	Derval (44) – IDELE/CA44	Limon argilo-sableux	507	184	0	19.9	6.4
	Bignan (56) – ARVALIS	Limon argileux sur schiste dur	432	137	0	17.4	6.4
	Trévarez (29) – INRA-SAS	Limon argilo-sableux	629	192	0		
	Bernienville (27) – ARVALIS	Limon battant	770	132	0	7.6	6.9
	Vraux (51) – ARVALIS	Craie blanche	223	121	572	22.7	8.3
	Faux (51) – UNIFA	Craie blanche	100	150	717	18.9	7.8
	Massognes (86) – UNIFA	Groie	400	300	60	17.4	7.5
2012	La Jaillière (44) – ARVALIS	Limon argileux sur schistes	457	204	0	12.8	6.9
	Derval (44) – IDELE/CA44	Limon moyen sableux	606	157	0	13.7	6.9
	Bignan (56) – ARVALIS	Limon argileux sur schiste dur	522	106	0	20.3	6.8
	Bernienville (27) – ARVALIS	Limon battant	788	104	1	10.5	8.0
	Vraux (51) – ARVALIS	Craie blanche	175	127	637	17.4	8.3
	En Crambade (31) – CETIOM	Terrefort	355	161	0	7.4	7.1
	Thibie (51) – UNIFA	Craie blanche	100	150	717	18.9	7.8
	Jarzay (86) – UNIFA	Groie	400	300	60	17.4	7.5

*après décarbonatation

Tableau 2 : modalités d'épandage de produits résiduels organiques étudiées.

Site		Modalité	Outils d'application*	Caractéristiques du produit organique			
Année	Lieu-organisme			Ntotal apporté (kgN/ha)	N-NH ₄ ⁺ apporté (kgN/ha)	MS (%pb)	pH
Tous les sites		Témoin sol travaillé sans apport					
2011	La Jaillière (44) – ARVALIS	LBS	BP	114	39	5.8	7.5
		LBE	BP+ODi (10)				
	Derval (44) – IDELE/CA44	LBS	P	136	61	6.4	7.3
		LBE	P+ODe (8)				
	Bignan (56) – ARVALIS	LPS	P	148	71	6.7	7.9
		LPE	P+ODi [8]				
Trévarez (29) – INRA-SAS	LPS	P	151	106	4.5		
	DLPS	P	171	123	4.4		
2012	La Jaillière (44) – ARVALIS	LBS	BP	75	27	5.6	8.5
		LBE	BP+ODi (10)				
	Derval (44) – IDELE/CA44	FBS	TE	116	26	27.9	
		FBE	TE+ODe (8)	99	22		
	Bignan (56) – ARVALIS	LPS	P	150	76	6.0	8.1
		LPE	P+OD [8]				

*Si enfouissement, celui-ci est effectué dans l'heure qui suit l'épandage. () = profondeur d'enfouissement en cm. LBS : Lisier de Bovin épandu en Surface ; LBE : Lisier de Bovin Enfoui ; LPS : Lisier de Porc épandu en surface ; LPE : Lisier de Porc Enfoui ; DLPS : Digestat de Lisier de Porc épandu en Surface ; FBS : Fumier de Bovin épandu en Surface ; FBE : Fumier de Bovin Enfoui ; BP : Buse Palette ; P : Pendillard ; ODi : Outil à Disque ; Ode : Outil à Dent ; TE : Table d'Épandage.

Tableau 3 : modalités d'épandage d'engrais minéraux étudiées.

Site		Culture/stade d'application	Engrais minéral étudié**	Quantité N apportée (kgN/ha)			
Année	Lieu-organisme			Ntotal	N-Urée	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
Tous les sites		Témoin sans apport					
2011	Bernienville (27) – ARVALIS	BTH – Z31	Ammonitrate 33.5	100	0	50	50
			Solution azotée 39		50	25	25
	Vraux (51) – ARVALIS	BTH – Z30	Ammonitrate 33.5	100	0	50	50
			Solution azotée 39		50	25	25
	Faux (51) – UNIFA*	BTH – Z30	Ammonitrate 33.5	100	0	50	50
			Urée 46		100	0	0
		BTH – Z39	Ammonitrate 33.5	50	0	25	25
			Urée 46		50	0	0
Massognes (86) – UNIFA*	Colza – C2D1	Ammonitrate 33.5	110	0	55	55	
		Urée 46		110	0	0	
2012	Bernienville (27) – ARVALIS	BTH – Z30	Ammonitrate 33.5	100	0	50	50
			Solution azotée 39		50	25	25
	Vraux (51) – ARVALIS	BTH – Z30	Ammonitrate 33.5	100	0	50	50
			Solution azotée 39		50	25	25
	En Crambade (31) – CETIOM	Colza – C1	Ammonitrate 33.5	100	0	50	50
			Urée 46		100	0	0
	Thibie (51) – UNIFA*	OH – Z31	Ammonitrate 33.5	80	0	40	40
			Urée 46		80	0	0
	Jarzay (86) – UNIFA*	BTH – Z30	Ammonitrate 33.5	65	0	32.5	32.5
			Urée 46		65	0	0
BTH – Z39		Ammonitrate 33.5	50	0	25	25	
		Urée 46		50	0	0	

*Pas de témoin sans apport ; **nombre=dosage en azote total de l'engrais ; BTH=blé tendre d'hiver ; OH=orge d'hiver ; Z30-Z31-Z39=échelle de Zadoks des stades de céréale à paille (respectivement épi 1 cm, 1 nœud et dernière feuille étalée) ; C1-C2-D1 : échelle des stades du colza (respectivement reprise de végétation, entre-nœuds visibles et boutons accolés).

2. Suivi des émissions d'ammoniac au champ

Le principe général du suivi repose sur l'utilisation de pièges à ammoniac dit badges ALPHA (pour Adapted Low-cost Passive High Absorption conçu par le CEH d'Edimbourg - Sutton et al. 2001), constitués d'une capsule en plastique équipée d'un filtre en cellulose enduit d'acide citrique captant l'ammoniac, positionné à une distance précise d'une membrane en Téflon perméable aux gaz. Les pièges sont posés et relevés selon 6 périodes d'exposition (X=date et heure d'épandage) : D1 = X+quelques heures ; D2 = X+1 jour ; D3 = X+2 jours ; D4 = X+3 jours ; D5=X+6 jours ; D6=X+15 à 20 jours. Les pièges sont disposés à 3 hauteurs : 30 cm et 1 m de la surface émettrice (sol ou sommet de la végétation) pour chacune des modalités testées, et à 3 m sur 3 mâts disposés autour du lieu d'essai afin de mesurer le « bruit de fond » du site (concentration en ammoniac de l'air ambiant). Une fois les pièges relevés et conditionnés, les quantités d'ammoniac captées sont extraites au laboratoire. La concentration en azote ammoniacal de l'air au niveau des pièges pour chacune des périodes d'exposition est obtenue avec la formule suivante :

$$[N - NH_3] = \frac{QNH_3}{D \times V} \quad [1]$$

[N-NH₃] = concentration en azote ammoniacal de l'air au niveau du piège pendant la période d'exposition (µg N-NH₃ m⁻³); QNH₃ = quantité d'azote ammoniacal capté par le piège (µg N-NH₃); D = durée d'exposition (h); V = constante débitométrique du piège à ammoniac (m³ h⁻¹).

3. Modélisation des flux d'ammoniac

Deux familles de modèles sont utilisées pour reconstituer les flux d'azote ammoniacal à partir des chroniques de concentrations obtenues par le suivi au champ. Les méthodes par gradients (Flechard and Fowler 1998; Sutton et al. 2000) se basent sur la différence de concentration entre les capteurs placés à différentes hauteurs de mesures, sur le différentiel entre ces hauteurs et sur un certain nombre de paramètres bioclimatiques. La 2^{ème} famille de méthodes consiste à utiliser le modèle de diffusion FIDES (Loubet et al. 2001 et 2010) en l'inversant. Ce type de modèle permet de déterminer la concentration en ammoniac en un point donné de l'espace à partir de la connaissance de la source d'ammoniac du site. En l'inversant, on peut reconstituer la source à partir d'une série de concentrations en ammoniac mesurées. Les deux types de méthodes ont été validés sur de grandes unités expérimentales. L'enjeu méthodologique de l'étude est donc de déterminer si elles sont utilisables simultanément sur plusieurs unités expérimentales plus restreintes et groupées, telles celles mises en place dans notre réseau expérimental. Seuls les résultats issus d'un modèle de gradients seront présentés dans cette communication, sachant que les comparaisons de modèles déjà réalisées indiquent une bonne convergence des résultats obtenus par les deux approches.

Résultats et discussion

1. Eléments de validation méthodologique

Plusieurs éléments nous permettent une 1^{ère} validation de la méthode employée :

- **Concernant le suivi des cinétiques d'évolution de la concentration en ammoniac de l'air (préalable au calcul de flux) à l'aide de capteurs passifs sur de petites unités expérimentales (400 m²) :** 1) les mesures réalisées sur les témoins sans apport et sur les mâts de bruits de fond ne présentent généralement pas ou peu de phénomènes de contamination par les sources d'ammoniac voisines que constituent les apports de fertilisants azotés. 2) le suivi est suffisamment précis et répétable pour permettre la comparaison de traitements expérimentaux générateurs de flux importants (certains produits résiduaux organiques par exemple) et aussi pour permettre la discrimination de flux de plus faibles ampleurs (générés par certains engrais minéraux par exemple).
- **Concernant la modélisation des flux d'azote ammoniacal émis :** bien que des ajustements restent encore à réaliser, les 1^{ers} modèles de calculs de flux utilisés permettent d'interpréter de façon pertinente les suivis en termes de pertes d'azote ammoniacal dans l'air. Les résultats obtenus sont cohérents avec la bibliographie internationale disponible (cf. Résultats et discussion -2 et -3).

2. Epanchages de produits résiduaux organiques

Les flux d'azote ammoniacal cumulés sur toutes les périodes d'exposition sont présentés dans le tableau 4. Par rapport aux quantités d'azote ammoniacal apporté, les émissions de produits non enfouis s'échelonnent de 29% à 76% pour les lisiers de bovins et de 11% à 70 % pour les lisiers de porcins. L'enfouissement permet à chaque fois de diminuer fortement les émissions voire même de les rendre non significatives dans certains cas. L'étude des cinétiques d'émissions (résultats non présentés) indique que l'essentiel du phénomène de volatilisation se produit dans une période allant de quelques heures à une journée suivant l'épandage. L'ensemble de ces résultats est cohérent avec les données bibliographiques disponibles, que ce soit en termes de gammes d'émissions ou d'efficacité de l'enfouissement (Sommer et Hutchings 2001).

Tableau 4 : Pertes d'azote ammoniacal par volatilisation suite à l'épandage de produits résiduels organiques, cumulées sur toute la durée d'expérimentation. Modèle de calcul de flux = « Gradients V2.2 ».

Site	Modalité	N-Total épandu (kgN/ha)	N-NH ₄ ⁺ épandu (kgN/ha)	Flux N-NH ₃ (kgN/ha)	Flux N-NH ₃ (% N-Total)	Flux N-NH ₃ (% N-NH ₄ ⁺)
Lisier de bovin						
2011/La Jaillière (44) – ARVALIS	LBS	114	39	11 b	10%	29%
	LBE	114	39	1 a	1%	2%
2011/Derval (44) – IDELE/CA44	LBS	136	61	24 b	18%	40%
	LBE	136	61	9 ab	7%	15%
2012/La Jaillière (44) – ARVALIS	LBS	75	27	21 b	28%	76%
	LBE	75	27	<1 a	<1 %	<1%
Moyenne ± écart- type	LBS				18% ± 9%	48% ± 25%
	LBE				3% ± 4%	6% ± 8%
Lisier de porc						
2011/Bignan (56) – ARVALIS	LPS	148	71	50 b	33%	70%
	LPE	148	71	8 a	5%	11%
2011/Trévarez (29) – INRA SAS	LPS	151	106	12 a	8%	11%
	DLPS	171	123	28 a	16%	22%
2012/Bignan (56) – ARVALIS	LPS	150	76	43 b	29%	56%
	LPE	150	76	9 a	6%	11%
Moyenne ± écart- type	LPS				23%± 14%	46%± 31%
	LPE				6%± <1%	11%± <1%
Fumier de bovin						
2012/Derval (44) – IDELE/CA44-B1	FBS	102	23	3	3%	15%
	FBE	68	15	-1	-1%	-6%
2012/Derval (44) – IDELE/CA44-B2	FBS	130	29	7	5%	24%
	FBE	130	29	3	3%	11%
Moyenne ± écart- type	FBS				4%± 1%	20%± 6%
	FBE				1%± 3%	3%± 12%

a, b, ab = groupes homogènes de modalités d'un test de Tukey à 5% (analyse de variance intra-essai). LBS : Lisier de Bovin épandu en Surface ; LBE : Lisier de Bovin Enfoui ; LPS : Lisier de Porc épandu en surface ; LPE : Lisier de Porc Enfoui ; DLPS : Digestat de Lisier de Porc épandu en Surface ; FBS : Fumier de Bovin épandu en Surface ; FBE : Fumier de Bovin Enfoui.

3. Epandages d'engrais minéraux

Les flux d'azote ammoniacal cumulés sur toutes les périodes d'exposition sont présentés dans le tableau 5. Par rapport à l'urée et à la solution azotée, l'ammonitrate affiche des émissions plus faibles dans la plupart de situations, bien que cette dernière forme puisse aussi émettre en cas d'accumulation de facteurs favorables à la volatilisation (pH du sol élevé, absence de pluie pénalisant l'absorption par la culture...). Cela confirme l'impact notable du pH du sol sur les émissions (facteur discriminant des émissions provenant de l'ammonitrate en 2011). Au-delà de ce classement général, le réseau expérimental n'a pas permis de discriminer les formes urée et solution azotée entre elles. L'étude des cinétiques d'émissions (résultats non présentés) indique une dynamique de volatilisation différente de celle des lisiers, atteignant généralement un pic 2 à 7 jours après l'épandage. La comparaison avec des données bibliographiques récentes (Chambers et Dampney 2009 ; Figure 1) indiquent la cohérence de ces résultats avec les connaissances antérieures.

Tableau 5 : Pertes d'azote ammoniacal par volatilisation suite à l'épandage d'engrais minéraux azotés, cumulées sur toute la durée d'expérimentations. Modèle de calcul de flux = « Gradients V2.2 ».

Site	Modalité	N-Total épandu (kgN/ha)	N-Urée+N-NH ₄ ⁺ épandu* (kgN/ha)	Flux N-NH ₃ (kgN/ha)	Flux N-NH (% N-Total)	Flux N-NH ₃ (% N-Urée+N- NH ₄ ⁺)
Ammonitrate vs solution azotée sur céréales à paille d'hiver						
2011/Bernienville (27) – ARVALIS	Ammo 33.5	100	50	<1 a	<1%	< 1%
	Sol. azotée 39	100	75	12 b	12%	16%
2011/Vraux (51) – ARVALIS	Ammo 33.5	100	50	13 b	13%	26%
	Sol. azotée 39	100	75	11 b	11%	15%
2012/Bernienville (27) – ARVALIS	Ammo 33.5	100	50	<1 a	<1%	<1%
	Sol. azotée 39	100	75	13 b	13%	17%
2012/Vraux (51) – ARVALIS	Ammo 33.5	100	50	4 a	4%	8%
	Sol. azotée 39	100	75	8 a	8%	10%
Moyenne ± écart-type	Ammo 33.5				4% ± 6%	8% ± 13%
	Sol. azotée 39				11% ± 2%	15% ± 3%
Ammonitrate vs urée sur céréales à paille d'hiver						
2011/Faux (51) – UNIFA	Ammo 33.5/Z30	100	50	8 a	8%	16%
	Urée 46/Z30	100	100	43 a	43%	43%
	Ammo 33.5/Z39	50	25	2 a	5%	10%
	Urée 46/Z39	50	50	4 a	8%	8%
2012/Thibie (51) – UNIFA	Ammo 33.5/Z31	80	40	5 a	6%	12%
	Urée 46/Z31	80	80	9 a	11%	11%
Jarzay (86) – UNIFA	Ammo 33.5/Z30	65	32.5	1 a	2%	4%
	Urée 46/Z30	65	65	3 a	4%	4%
	Ammo 33.5/Z39	50	25	5 a	10%	21%
	Urée 46/Z39	50	50	7 a	15%	15%
Moyenne ± écart-type	Ammo 33.5				6% ± 3%	13% ± 6%
	Urée 46				16% ± 16%	16% ± 16%
Ammonitrate vs urée sur colza d'hiver						
2011/Massognes (86) – UNIFA	Ammo 33.5	110	55	11 a	10%	19%
	Urée 46	110	110	13 a	12%	12%
2012/En Cramb. (31) – CETIOM	Ammo 33.5	100	50	2 ab	2%	3%
	Urée 46	100	100	3 b	3%	3%
Moyenne ± écart-type	Ammo 33.5				6% ± 6%	11% ± 11%
	Urée 46				7% ± 6%	7% ± 6%

a, b = groupes homogènes de modalités d'un test de Tukey à 5% (analyse de variance intra-essai).

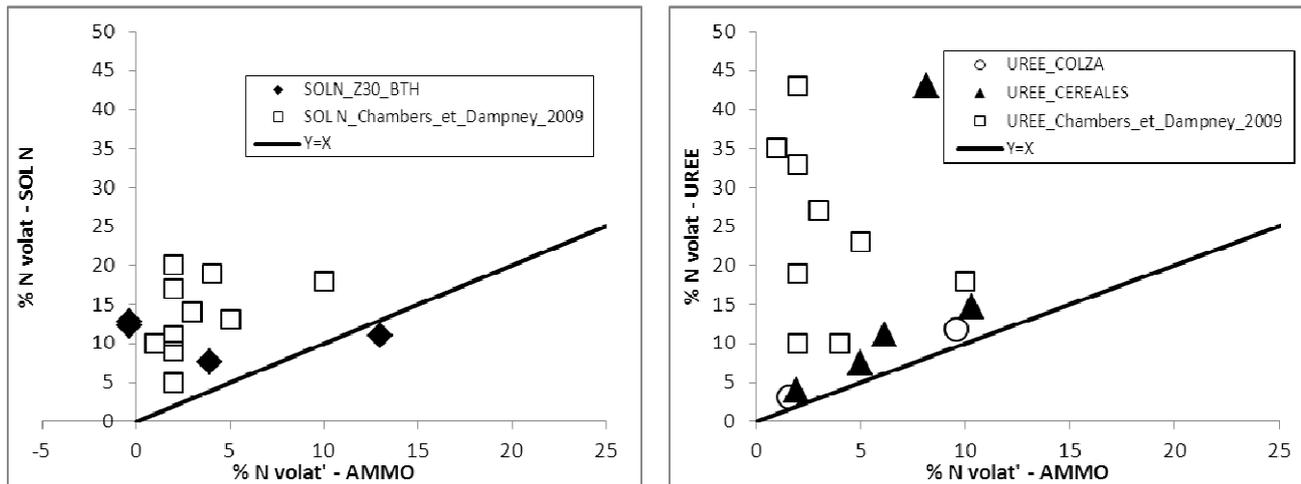


Figure 1 : Emissions d'azote ammoniacal de solution azotée (à gauche) et de l'urée (à droite) par rapport aux émissions de l'ammonitrate (% de l'azote total apporté). Résultats du projet replacés dans les résultats présentés dans Chambers et Dampney 2009.

Conclusion et perspectives

Les 1^{ers} éléments de validation méthodologique vont être complétés suite à l'affinement des modèles de calculs de flux. Nous pouvons néanmoins d'ores et déjà conclure que le projet a permis d'établir une méthode utilisable facilement au champ pour suivre les émissions d'azote ammoniacal sur des unités expérimentales adaptées au plan d'expérience factoriel en bloc. Les résultats obtenus montrent en particulier que les répétitions par blocs permettent de valider les différences entre traitements.

L'étude des facteurs déterminant les émissions suite aux modalités d'épandage testées (caractéristiques des produits, conditions agroclimatiques...) va se poursuivre notamment via l'ajustement des cinétiques d'émissions selon des formalismes couramment employés dans la bibliographie (de type Michaelis-Menten pour les produits résiduels organiques ou logistique pour les engrais minéraux).

La méthode va être déployée sur de nouvelles expérimentations afin d'étudier l'impact d'autres pratiques culturales sur les émissions d'azote ammoniacal. Citons notamment des apports de lisiers au tallage des céréales, des apports de fientes de volailles sur sol nu, des comparaisons tripartite ammonitrate/urée/solution azotée et l'étude d'engrais minéraux avec additifs.

Références bibliographiques

- Chambers B.J., Dampney P.M.R., 2009. Nitrogen efficiency and ammonia emissions from urea-based and ammonium nitrate fertilisers. International Fertiliser Society Conference, Cambridge, 9th December 2009, Proceedings 657, 1-20.
- CITEPA 2012. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues. CITEPA Ed.
- Cohan J.P., Laurent F., Lellahi A., 2011. Fertiliser les cultures : concilier efficacité technique et défis environnementaux. DEMETER, 2011, 269-327.
- COMIFER 2013. Calcul de la fertilisation azotée-Guide méthodologique pour l'élaboration des prescriptions locales ; cultures annuelles et prairie. Ed. COMIFER 159 p.
- Faburé J., Rogier S., Loubet B., Générumont S., Saint-Jean S., Bedos C., Cellier P. 2011. Synthèse bibliographique sur la contribution de l'agriculture à l'émission de particules vers l'atmosphère : Identification de facteurs d'émission. Rapport INRA/ADEME 164 p.
- Flechard, C.R. et Fowler, D., 1998. Atmospheric ammonia at a moorland site. II: Long-term surface-atmosphere micrometeorological flux measurements. Q. J. R. Meteorol. Soc. 124, 759-791.
- Loubet, B., Générumont, 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.
- Loubet B., Générumont S., Personne E., Massad R.S., 2011. Can we estimate ammonia emissions by inverse modelling with time averaged concentrations? Nitrogen and Global Change. Key findings and future challenges" Conference, Edinburgh, 11-14 April 2011.
- Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S., 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. in Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes - Annales colloques INRA 83 - Reims (France) 19-20 nov. 1996 - INRA Ed., 183-199.
- Sommer S.G., Hutchings N.J., 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction - invited paper. European Journal of Agronomy, 15, 1-15.
- Sutton M.A., Nemitz E., Milford C., Fowler D., Moreno J., San José R., Wyers G.P., Otjes R.P., Harrison R., Husted S., 2000. Micrometeorological measurements of net ammonia fluxes over oilseed rape during two vegetation periods. Agricultural and Forest Meteorology, 105, 351-369.
- Sutton, M.A., Tang, Y.S., Miners, B., Fowler, D., 2001. A new diffusion denuder system for long-term regional monitoring of atmospheric ammonia and ammonium. Water Air and Soil Pollution: Focus(1): 145-156.

Annexe : résumé des principaux relevés météorologiques durant les essais

Site		Paramètre	Plage d'exposition						
Année	Lieu-organisme		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D1 à D6
2011	La Jaillière (44) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.4	1.2	1.3	1.6	1.9	1.5	1.6
		Temp. moyenne (°C)	17.4	12.8	16.6	15.8	14.6	13.9	14.2
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	6.4	6.6
	Derval (44) – IDELE/CA44	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.8	2.1	1.5	1.3	1.5	2.2	2.1
		Temp. moyenne (°C)	16.9	11.8	11.4	9.6	12.3	12.9	12.6
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	18.4	3.4	21.8
	Bignan (56) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	3.6	1.4	1.0	1.9	1.3	1.7	1.6
		Temp. moyenne (°C)	14.1	11.9	15.2	14.9	14.2	13.2	13.5
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	1.0	1.6
	Trévarez (29) – INRA-SAS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.5	1.1	1.9	3.2	1.9	1.3	1.6
		Temp. moyenne (°C)	14.4	11.5	10.1	12.1	11.5	13.9	12.7
		Cumul pluie (mm)	0.0	9.7	1.6	4.6	2.4	0.0	18.3
	Bernienville (27) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	4.0	1.3	1.3	0.9	1.4	1.6	1.5
		Temp. moyenne (°C)	11.1	6.0	8.6	10.6	10.7	13.6	12.4
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.2	12.2
	Vraux (51) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.0	1.7	1.0	1.7	1.8	1.9	1.8
		Temp. moyenne (°C)	11.1	6.9	9.9	11.6	11.0	15.5	13.9
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0
	Faux (51)/S1 – UNIFA	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.0	1.9	2.1	2.6	2.9	2.4	2.5
		Temp. moyenne (°C)	17.6	10.5	11.4	10.6	12.0	12.5	12.0
		Cumul pluie (mm)	0.0	3.0	0.2	0.0	12.6	0.6	16.4
Faux (51)/S2 – UNIFA	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.0	2.0	1.8	2.5	1.9	2.3	2.1	
	Temp. moyenne (°C)	19.5	15.1	13.0	11.7	16.7	15.2	15.2	
	Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.2	13.9	16.0	30.1	
Massognes (86) – UNIFA	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.9	6.1	4.1	3.9	2.6	3.4	3.3	
	Temp. moyenne (°C)	11.2	9.8	8.4	6.8	10.6	12.1	10.5	
	Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.2	0.4	6.4	9.8	16.8	
2012	La Jaillière (44) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	3.0	2.1	2.6	2.1	2.4	2.0	2.1
		Temp. moyenne (°C)	18.8	14.0	14.7	13.4	10.1	8.4	9.6
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.0	29.0
	Derval (44) – IDELE/CA44	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.9	2.0	2.7	1.2	2.2	2.1	2.1
		Temp. moyenne (°C)	11.5	8.1	12.1	10.6	14.2	10.4	10.9
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.6	0.6	0.2	0.0	21.6	23.0
	Bignan (56) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.7	2.6	2.5	1.7	2.6	2.1	2.2
		Temp. moyenne (°C)	12.4	15.3	12.7	10.6	9.0	7.9	8.8
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	23.8	24.2
	Bernienville (27) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.0	1.5	1.9	2.8	2.7	2.8	2.7
		Temp. moyenne (°C)	13.3	6.3	8.5	7.2	7.7	6.3	6.8
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.0	1.2	0.0	10.4	37.0	48.6
	Vraux (51) – ARVALIS	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.4	1.5	2.8	3.6	2.7	2.6	2.6
		Temp. moyenne (°C)	15.7	9.6	9.5	9.0	8.3	7.4	8.0
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.5	0.0	0.0	3.0	43.5	47.0
	En Crambade (31) – CETIOM	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.0	0.8	0.9	2.4	2.0	2.1	1.9
		Temp. moyenne (°C)	15.6	5.3	7.3	10.9	8.2	8.7	8.6
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.2	0.0	0.0	7.8	7.8	15.8
	Thibie (51) – UNIFA	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.4	1.3	3.1	3.4	2.4	2.7	2.6
		Temp. moyenne (°C)	16.9	9.2	9.4	9.0	7.5	7.7	8.0
		Cumul pluie (mm)	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	51.0	52.0
Jarzay (86)/S1 – UNIFA	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	2.6	3.7	2.2	1.7	1.4	1.8	1.8	
	Temp. moyenne (°C)	11.2	8.3	5.7	6.7	11.6	9.5	9.6	
	Cumul pluie (mm)	0.4	1.0	3.8	2.8	0.2	1.0	9.2	
Jarzay (86)/S2 – UNIFA	Vit. vent moyenne (m.s ⁻¹)	1.4	1.0	1.2	2.9	3.1	2.9	2.7	
	Temp. moyenne (°C)	8.3	7.5	7.7	6.3	8.7	10.3	8.9	
	Cumul pluie (mm)	0.4	0.2	0.4	5.0	31.8	81.6	119.4	