

Simulation de la faisabilité d'un plan d'épandage de lisier de porc et conséquences sur les émissions gazeuses au stockage et à l'épandage

Jean-Marie PAILLAT(1,3), Santiago LOPEZ-RIDAURA(2), François GUERRIN(3,4),
Hayo VAN DER WERF(1), Thierry MORVAN(1), Philippe LETERME(1)

(1) INRA, Agrocampus Ouest, UMR 1069, Sol Agro&hydro système Spatialisation, 65 rue de St Brieuc, F35042 Rennes Cedex 1

(2) INRA, Supagro, UMR Innovation, 2 place Pierre Viala, F34060 Montpellier Cedex 2

(3) CIRAD, UPR Risque environnemental lié au recyclage, TA B-78 / 01, Anue Agropolis, F34398 Montpellier Cedex 5

(4) INRA, UPR 875, Biométrie et intelligence artificielle, Chemin de Borde Rouge, BP 52627, F31326 Castanet Tolosan Cedex

jean-marie.paillat@rennes.inra.fr

Simulation de la faisabilité d'un plan d'épandage de lisier de porc et conséquences sur les émissions gazeuses au stockage et à l'épandage

Le transfert de lisier hors zone d'excédent structurel et son épandage collectif sont envisagés pour gérer les excédents des exploitations porcines dépassant les seuils réglementaires. La substitution d'engrais chimique permise réduit les impacts sur l'environnement. Cependant, ce transfert nécessite des moyens logistiques en adéquation avec les contraintes de sols, cultures, climat et organisation. Le modèle COMET (COLlective Management model of Effluents on a Territory scale) simule la réalisation de plans d'épandage soumis à ces contraintes. Le cas étudié concerne le transfert de lisier de porcs charcutiers de 11 élevages vers 22 exploitations situées à une distance moyenne de 44 km : 57,6 t d'azote sont épandues sur des céréales d'hiver, du maïs, du colza et des prairies. Pour réaliser ce transfert, 4 camions de 25 m³, un stockage intermédiaire de 200 m³ et un épandeur avec enfouisseur (débit de 60 m³ h⁻¹) sont nécessaires. En comparant une fin d'hiver humide (2001) et sèche (2002), les simulations montrent que ces moyens sont insuffisants pour épandre la quantité prévue sur les céréales (83 % réalisé). En conditions de sol médiocres (hydromorphie), le taux de réalisation est inférieur à 50 %. Il en est de même si l'épandeur est peu disponible (3 vs 5 jours par semaine). Le cumul des 2 situations réduit la réalisation au tiers de la prévision, l'épandage sur maïs étant également affecté. Davantage de colza dans l'assolement permet de mieux satisfaire le plan sauf en année humide sur sol hydromorphe. Les émissions gazeuses résultant sont également discutées.

Simulation of the feasibility of a collective slurry spreading plan and effects on gaseous emissions from storage and after spreading

Slurry transfer from areas exceeding 170 kg N ha⁻¹ and its collective spreading are used to manage slurry excess in pig farms. The resulting chemical fertilisers' substitution reduces environmental impacts. However, this transfer requires logistical means in good agreement with soils, crops, climate and management constraints. The model COMET (COLlective Management model of Effluents on a Territory scale) simulates the spreading plan management under these constraints. The studied case concerns fatteners' slurry transfer from 11 pig farms to 22 crop farms over an average 44 km distance: 57.6 t N are spread on winter cereals, maize, oilseed rape and meadow. This transfer operation requires four 25 m³ payload trucks, a 200 m³ intermediate storage and a spreader with injectors spreading at the rate of 60 m³ h⁻¹. When comparing a humid late winter (2001) and a dry one (2002), simulations show that these means are not adequate to spread the planned dose on cereals (83% are realised). On wet soils or when the spreader is less available (3 vs 5 days per week) the realisation rate is less than 50%. These two constraints taken together reduce the realisation to less than the third of the planned dose, and the spreading on maize is also affected. The introduction of more oilseed rape in the cropping plan allows better satisfaction of the objective excepted in a wet year on wet soil. The consequences on gaseous emissions are also discussed.

INTRODUCTION

La Bretagne concentre 40% de la production animale française (Savelli et Cebron, 2006) ; il en résulte un excédent de production de fertilisants organiques par rapport aux besoins des cultures : 104 des 187 cantons de Bretagne sont déclarés en zone d'excédent structurel (ZES : plus de 170 kg de N d'origine animale par ha épanachable). Dans ces cantons, les élevages produisant plus de 12500 à 20000 kg d'azote par an (seuil cantonal) doivent proposer un plan de résorption en traitant l'azote excédentaire ou en l'exportant dans une zone inférieure à 140 kg N-animal ha⁻¹.

Pour se conformer à cette réglementation, un groupe d'éleveurs du Sud-Est de l'Ille et Vilaine a élaboré un plan d'épandage collectif de lisier de porc. Pour cette étude, nous n'avons retenu qu'une partie de ce plan, soit 57,6 t d'azote qui proviennent de 11 élevages porcins et qui doivent être transférées chez 22 prêteurs de terres à une distance moyenne de 44 km (33 à 55). Le transfert ne concerne que du lisier de porc à l'engraissement représentant 38 % de la production de lisier des 11 exploitations ; les 62 % restant sont épandus sur les terres de chaque exploitation.

Une analyse de cycle de vie a montré l'intérêt environnemental du transfert par rapport au traitement (Lopez-Ridaura et al., 2008), essentiellement en raison de la substitution des engrais minéraux. Cependant, les éleveurs et les techniciens concernés par le plan d'épandage s'interrogent sur la faisabilité du plan, sur les équipements nécessaires pour le transport et l'épandage et sur l'organisation à mettre en place, notamment en fin d'hiver lorsque les contraintes climatiques sont fortes. Se pose également la question des conséquences de ces aspects logistiques sur les émissions gazeuses et sur l'azote effectivement transféré.

L'objectif de cette communication est de simuler et comparer plusieurs scénarios de gestion collective du lisier avec COMET (Collective Management model of Effluents on a Territory scale), un modèle qui simule la logistique (stockage, transport, épandage) d'une gestion collective d'effluents d'élevage ainsi que les principales émissions gazeuses qui en résultent.

1. DESCRIPTION ET PARAMÉTRAGE DU MODÈLE COMET

COMET, implémenté avec le logiciel Vensim®, simule la gestion d'effluents d'élevage dans plusieurs exploitations productrices

et leur transfert vers plusieurs exploitations consommatrices (Figure 1) en représentant l'interaction dynamique entre les flux de matière et les pratiques.

Composé de plusieurs modules simulant la production, le stockage, le transport et l'épandage d'effluents d'élevage ainsi que les principales émissions polluantes (NH₃ et CH₄) durant le stockage et l'épandage, COMET est basé sur le couplage de modèles existants (Lopez-Ridaura et al., 2007) : Magma (Guerrin, 2001), Approzut (Guerrin, 2004) et Stal (Morvan et Leterme, 2001) ; un module original simulant l'émission au stockage y a également été ajouté. Bien que les données climatiques utilisées soient journalières, le pas de temps de calcul est de 22,5 min afin de représenter des activités courtes telles que l'épandage et le transport.

1.1. Production et stockage du lisier

La production de lisier est calculée quotidiennement pour chaque type d'animal en utilisant les références de Levasseur (1999). Pour simplifier le modèle, nous avons considéré que les places en bâtiment (les animaux ne sont pas simulés dans COMET) collectaient régulièrement du lisier dans des préfosse vidangées à intervalles réguliers (soit tous les 36,5 jours pour les truies allaitantes, les porcelets et les charcutiers et tous les 150 jours pour les truies gestantes). L'azote émis en bâtiment, soit 25 % de l'azote produit selon CORPEN (2003), est soustrait de l'azote du lisier évacué. Les 11 élevages porcins totalisent 2 232 truies, 8 488 places de porcelets et 11 390 places de charcutiers (Deltour, 2007).

Le plan d'épandage collectif ne concerne que du lisier de porc charcutier plus concentré. Dans COMET, une fosse de stockage est représentée dans chaque exploitation spécifiquement pour le lisier de porc à l'engraissement destiné au plan d'épandage collectif. Les unités de stockage sont le plus souvent non couvertes (Figure 1).

Pendant le stockage, l'ammoniac et le méthane sont les principaux gaz émis. Les facteurs d'émission de Loyon et al. (2007) ont été retenus et corrigés par la concentration en azote du lisier (pour l'ammoniac) et par la température (pour les deux gaz) en utilisant les équations de Pelletier et al. (2006).

Le volume de stockage disponible pour le lisier d'engraissement a été estimé à 7 254 m³ pour les 11 élevages (Deltour, 2007). Seule la surface des fosses extérieures a été retenue pour le calcul de la dilution par la pluie et de l'émission d'ammoniac au stockage. L'émission de méthane a été calculée pour la masse totale stockée.

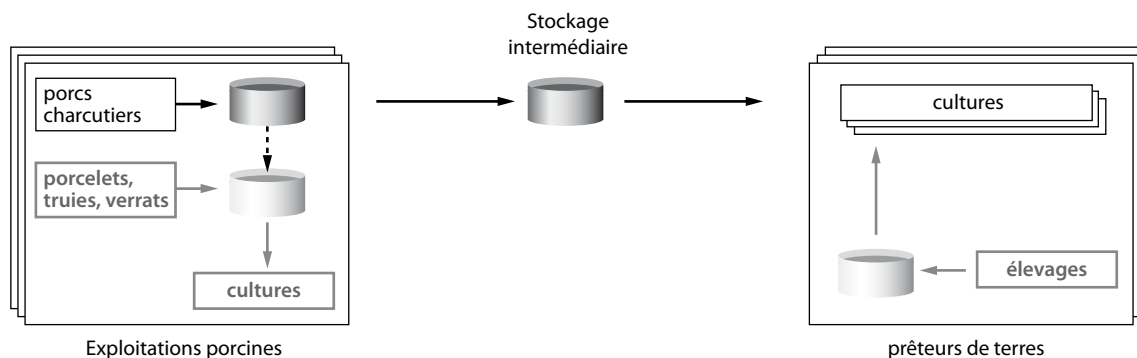


Figure 1 - Structure du plan d'épandage collectif d'effluents d'élevage (les éléments et flux en gris, compris dans Comet, ne sont pas considérés dans cette analyse)

Tableau 1 - Quantités d'azote apportées par les exploitations porcines et épandues sur les cultures des exploitations importatrices impliquées dans le plan d'épandage collectif

Exploitations importatrices	Surface épandable ⁽¹⁾ (ha)	N apporté par le plan d'épandage collectif ⁽²⁾ (kg)					
		Blé ⁽³⁾	Triticale	Colza ⁽³⁾	Maïs	Prairie	Total
C1	32,4					976	976
C2	54,3	790 (711)		0 (79)			790
C3	59,6	552 (497)		0 (55)	342		894
C4	33,4	348 (313)		0 (35)			348
C5	57,9			602 (602)	847		1449
C6	6,4	300 (270)		0 (30)		379	679
C7	15,7	400 (360)		0 (40)	186	507	1093
C8	32,4	840 (756)		0 (84)	393		1233
C9	51,1					1500	1500
C10	26,2	500 (450)		0 (50)		1000	1500
C11	38,0	500 (450)		0 (50)	637	1200	2337
C12	45,3	1769 (1592)		0 (177)	857	600	3226
C13	43,3	800 (720)	200	0 (80)		3200	4200
C14	52,4	1500 (1350)	192	0 (150)	463	1000	3155
C15	58,6	2000 (1800)		0 (200)	867	650	3517
C16	74,1		1500		516	1681	3697
C17	87,8	2200 (1980)	900	754 (974)		3600	7454
C18	49,8	3200 (2880)		3052 (3372)			6252
C19	52,8	2200 (1980)		310 (530)	467	638	3615
C20	53,2	800 (720)		0 (1130)	1130		1930
C21	30,6	1190 (1071)	1100	0 (119)	1097	160	3547
C22	68,5	2400 (2160)		0 (240)	803	1000	4203
Total	1023,7	22289 (20060)	3892	4718 (6947)	8605	18091	57595
%		38,7 (34,8)	6,8	8,2 (12,1)	14,9	31,4	100,0

⁽¹⁾ Une partie seulement de cette surface reçoit le lisier des exploitations porcines chaque année.

⁽²⁾ La quantité totale d'azote sur chaque culture est fournie par le lisier de porc importé avec le plan d'épandage collectif et par les fertilisants organiques produits sur l'exploitation puis complétée par des fertilisants minéraux si besoin.

⁽³⁾ Entre parenthèses figure la quantité d'azote à épandre lorsqu'on modifie l'assolement dans les scénarios J et K.

Tableau 2 - Présentation des scénarios simulés

Scénarios	Assolement	Délai (j) entre la dernière pluie et l'épandage en fonction de P-ETP*						Disponibilité de l'épandeur (j par semaine)
		Céréales			Prairie			
		<0	0-2	<2	<0	0-2	<2	
F	base	0	2,5	5	0	1	2,5	5
G	base	0	2,5	5	0	1	2,5	3
H	base	1	4	7	0,5	2	4	5
I	base	1	4	7	0,5	2	4	3
J	-10 % sur blé	0	2,5	5	0	1	2,5	5
K	-10 % sur blé	1	4	7	0,5	2	4	5

* P-ETP (mm j^{-1}) est la moyenne mobile sur dix jours de la différence entre la pluie et l'évapotranspiration potentielle : deux seuils pour P-ETP sont définis dans nos simulations, 0 et 2 mm j^{-1} .

1.2. Transport et épandage du lisier

Le lisier d'engraisement est transporté par des camions jusqu'à un stockage mobile (poche en PVC, WINBAG™) situé dans la zone d'épandage, fermé et donc, ne recueillant pas de pluie et n'émettant pas de gaz. Son approvisionnement est basé sur la règle décrite dans Guerrin et Médoc (2005) selon laquelle la fosse la plus pleine est vidangée en premier.

Les calendriers d'épandage sont définis par culture en respectant les périodes d'interdiction réglementaires. Les quantités

d'azote épandues sont définies dans le plan collectif soumis à autorisation (Pinel, 2005) (Tableau 1), qui a été construit en respectant le plan de fertilisation de chaque exploitation importatrice (< 170 kg N-animal ha^{-1} , pas d'épandage près des cours d'eau, ni sur maïs après prairie, ni sur légumineuses, dose calculée n'excédant pas les besoins en phosphore).

Dans COMET, l'épandage est régi par une priorité selon les cultures : céréales d'hiver > colza > maïs > prairies. De plus, basée sur les dires des techniciens de la CUMA Innov35, la faisabilité

Tableau 3 - Influence du climat (2001 vs 2002), de la disponibilité de l'épandeur (scénarios F vs G et H vs I), de l'aptitude des sols à l'épandage (scénarios F vs H et G vs I) et d'une modification d'assolement (scénarios F vs J et H vs K) sur les apports d'azote par le lisier aux différentes cultures (comparés aux apports prévus par le plan d'épandage) et sur les émissions de N-NH₃ et de CH₄

Scénario	année	N apporté par le lisier				Emissions		
		Céréales	Maïs	Colza	Prairie	Total	N-NH ₃ (%N total apporté)	CH ₄ (kg)
		(Mg)						
N prévu		26,2 (%)	8,6 (%)	4,7	18,1	57,6 (%)		
F	2001	21,8 (83)	9,3	4,9	18,5	54,5 (95)	18,9	45
	2002	24,5 (94)	9,3	5,0	18,7	57,5 (100)	18,4	42
G	2001	12,1 (46)	6,8 (79)	5,0	19,0	42,9 (74)	24,2	60
	2002	19,8 (76)	9,4	5,0	18,7	52,8 (92)	19,3	65
H	2001	12,5 (48)	9,2	5,0	19,2	45,9 (80)	22,9	45
	2002	23,4 (89)	9,3	5,0	18,6	56,4 (98)	18,6	42
I	2001	8,2 (31)	4,2 (49)	5,0	19,0	36,5 (63)	27,7	72
	2002	11,2 (43)	7,0 (81)	4,9	18,5	41,7 (72)	24,7	62
N prévu		24,0 (%)	8,6	6,9	18,1	57,6 (%)		
J	2001	21,8 (91)	9,3	7,7	18,6	57,3 (99)	18,6	44
	2002	24,5 (100)	9,4	7,8	18,7	60,0 (100)	18,1	39
K	2001	12,3 (51)	9,2	7,9	19,2	48,6 (84)	22,1	59
	2002	22,2 (93)	9,3	7,8	18,6	58,0 (100)	18,6	41

de l'épandage dépend du climat (Lopez-Ridaura et al., 2007) : si [pluie – ETP (évapo-transpiration potentielle) du jour] > 0, alors pas d'épandage ; et si [moyenne mobile sur dix jours de pluie – ETP] > seuil (0 et 2 mm dans nos simulations, tableau 2), alors délai d'attente ; ce délai dépend du type de sol (sol sain vs hydromorphe) et de l'occupation du sol (culture vs prairie).

L'épandage est réalisé avec un Terragator® (Anon., 2005) équipé d'injecteurs. Pour simuler l'émission d'ammoniac après épandage avec STAL, nous avons repris les paramètres de la Bretagne (Morvan, 1999) avec une réduction de 80 % en raison de l'enfouissement du lisier.

1.3. Simulations

De nombreux scénarios peuvent être simulés avec COMET. Les simulations réalisées pour dimensionner le chantier d'épandage (scénarios A à E non présentés ici) ont abouti à l'utilisation de 4 camions de 25 m³ roulant à 50 km h⁻¹ en moyenne, avec un stockage intermédiaire de 200 m³ pour approvisionner l'épandeur à un débit de chantier de 60 m³h⁻¹ durant 5 jours de 10 heures consécutives de travail par semaine. Dans cette communication, nous avons choisi de présenter les simulations (Tableau 2) concernant : (i) la disponibilité du matériel d'épandage (3 ou 5 jours d'épandage par semaine), ainsi que l'accès aux parcelles qui dépend du climat (2 années climatiques contrastées) et du type de sol : sain (scénarios F et G) ou hydromorphe (scénarios H et I), et (ii) la modification de l'assolement de base où la surface en blé est réduite de 10 %, réduisant d'autant les apports qui sont alors reportés sur le colza (scénarios J et K).

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour chaque scénario simulé, le tableau 3 présente la comparaison entre la planification « théorique » proposée par le plan d'épandage (Tableau 1) et la répartition des quantités d'azote calculées par le modèle en fonction des contraintes définies par les scénarios présentés dans le tableau 2. Le tableau 3 présente également les émissions d'ammoniac et de méthane au stockage et à l'épandage qui résultent de la gestion des apports aux cultures.

On notera que les quantités épandues peuvent dépasser les quantités à épandre. Ceci est lié au pas de temps de simulation de 22,5 min qui correspond à un épandage de 22,5 m³. Cette incertitude de simulation est d'autant plus importante que les soles à épandre sont petites, par exemple elle atteint 15 % pour le colza dans les scénarios J et K où la quantité d'azote à épandre peut descendre à 30 kg, car, dans l'objectif du test, nous avons substitué 10 % des apports sur blé de façon indifférenciée chez chaque prêteur. Cette incertitude, liée au modèle, est identifiable dans la réalité au fait que les petites parcelles provoquent davantage de recoupement entre les passages de l'épandeur qui n'épand par ailleurs que des citernes pleines, ce qui crée une surdose en fin d'épandage sur chaque sole.

2.1. Effet combiné de l'accès limité aux parcelles et de la disponibilité de l'épandeur

Pour une année humide telle que 2001, l'augmentation du délai d'entrée dans les parcelles en raison de la pluie (scénarios F vs H et G vs I) ou la réduction du temps disponible (scénarios F vs G

et H vs I) diminuent de 21 % et 16 % respectivement, la performance (N apporté simulé en % de N prévu, cf. tableau 3) du plan d'épandage collectif. Pour une année plus sèche comme 2002, les mêmes contraintes diminuent seulement de 8 % la performance. L'effet combiné de sols peu drainant et d'une faible disponibilité de l'épandeur (scénario I) réduit la performance de 34 % en année humide (2001) et de 17 % en année sèche (2002). Ce sont toujours les céréales d'hiver qui ne reçoivent pas la quantité d'azote planifiée, mais parfois (scénarios G en 2001 et I pour les 2 années), on constate également un déficit sur le maïs. Lorsque l'épandage concerne des sols hydromorphes (scénarios H et I), il est indispensable que le matériel soit disponible en permanence et ait une bonne performance de chantier. Cependant, ces conditions ne sont pas encore suffisantes pour satisfaire tous les épandages lorsque la fin d'hiver est particulièrement humide (scénario H en 2001). Le niveau et la disponibilité des équipements sont une assurance pour la réalisation des transferts de lisier.

La perte d'azote représente de 18,4 à 27,7 % de l'azote apporté, dont 18 % en moyenne sont liés à la volatilisation après épandage, soit 5,2 à 7,8 % de l'azote ammoniacal du lisier épandu, ce qui est un résultat cohérent avec les données de la bibliographie (Morvan et al., 1997 ; Générmont et al., 1998 ; Misselbrook et al., 2002) ; la perte principale provient du stockage. L'émission de méthane et celle d'ammoniac (exprimée par rapport à l'azote apporté) sont supérieures lorsque le plan d'épandage n'est pas complètement réalisé.

Lorsque le lisier ne peut être exporté, il doit être géré sur l'exploitation porcine. Ceci conduit à une surfertilisation des cultures de l'exploitation porcine et à un besoin d'achat d'engrais dans les exploitations importatrices. Cela diminue notablement l'intérêt environnemental du transfert, tel qu'il a été présenté avec l'analyse du cycle de vie par Lopez-Ridaura et al. (2008).

2.2. Effet d'une modification d'assolement

Le contexte économique peut inciter les producteurs à modifier leur assolement, par exemple en introduisant davantage de colza dans les rotations pour répondre au marché des biocarburants, sous réserve toutefois que l'approvisionnement en grains et fourrages des ateliers animaux soit assuré. Les simulations pour deux scénarios J et K (Tableau 3) où 10 % de la surface en blé est remplacée par du colza pour deux règles d'accès aux parcelles (sol sain et hydromorphe respectivement) sont comparées respectivement à celles des scénarios F et H.

Les contraintes étant identiques, les quantités épandues sur céréales d'hiver ne sont pas modifiées avec l'assolement que ce soit en année sèche (2002) ou humide (2001). Cependant, le plan d'épandage est entièrement réalisé en année sèche alors qu'il l'était seulement à 94 % avec davantage de blé dans l'assolement. En année humide, la modification d'assolement ne suffit toujours pas pour réaliser complètement le plan d'épandage malgré une meilleure performance : 91 % vs 83 % des surfaces

épandues (scénarios J et F respectivement). Lorsque le sol est hydromorphe, le constat est identique, la performance s'améliore en raison de la diminution des surfaces à épandre en fin d'hiver, sans que le plan soit complètement réalisé : 51 % (K) vs 48 % (H) et 93 % (K) vs 89 % (H) des apports réalisés pour une année humide et sèche respectivement. Toutes cultures confondues, le plan d'épandage est mieux réalisé car l'apport sur colza en fin d'été ne subit pas d'aléa climatique : 100 % (J et K) du lisier est épandu en année sèche sur sol sain ou hydromorphe, 99 % (J) et 84 % (K) en année humide sur sol sain et hydromorphe, respectivement. Comme dans les comparaisons de scénarios précédentes, les émissions d'ammoniac rapportées à l'azote épandu et de méthane sont inférieures lorsque le plan d'épandage est mieux réalisé.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les éleveurs cherchent des solutions pour valoriser les excédents de nutriments en accord avec la réglementation. Le transfert des effluents vers des zones déficitaires en azote s'avère intéressant notamment pour les exploitations de petite taille qui ne peuvent faire du traitement individuel. L'organisation collective de ce transfert n'est cependant pas une tâche simple. La combinaison du niveau et de la disponibilité des équipements, l'assolement, le type de sol et les conditions climatiques jouent un rôle déterminant.

COMET est capable de simuler la logistique de la gestion collective des effluents ainsi que l'impact de cette gestion sur les émissions gazeuses. La disponibilité en moyens de transport et d'épandage et leurs performances sont cruciales pour la réalisation effective du plan d'épandage collectif, notamment en fin d'hiver lorsque les conditions de climat, de sol et de cultures sont critiques.

Le développement de COMET est envisagé pour (i) valider les résultats obtenus en relation avec les acteurs, (ii) simuler de façon approfondie différents assolements compatibles avec les systèmes d'élevage et (iii) étudier l'interaction entre le niveau collectif et le niveau individuel (gestion des effluents au sein de l'exploitation productrice).

REMERCIEMENTS

Nous remercions les éleveurs, membres du GIE Terre Eau, et le bureau d'étude Alcyon qui nous ont fourni les données du plan d'épandage collectif, ainsi que Bertrand Le Bris de la Chambre d'agriculture d'Ille et Vilaine et les techniciens de la CUMA Innov35 pour l'élaboration des règles de gestion du plan. Merci également à Lucie Deltour qui a effectué les enquêtes auprès des éleveurs.

Ce travail a été réalisé grâce à l'allocation de post-doctorat attribué par l'Inra et grâce au soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche : projet ANR-06-PADD-017 SPA/DD.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonymous, 2005. Ag-Chem fleet keeps contractor ahead. *Serious Machinery. Challenger: The magazine for professional farming from Challenger and Ag-Chem.* June, 6-7.
- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote phosphore potassium cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Paris, 41 p. www.ecologie.gouv.fr/-CORPEN-.html, 23 p.
- Deltour, L., 2007. Evaluation environnementale de différents modes de gestion de lisier de porc à l'aide de l'Analyse de Cycle de Vie. Mémoire ENESAD, Dijon.
- Genermont, S., Cellier, P., Flura, D., Morvan, T., Laville, P., 1998. Measuring ammonia fluxes after slurry spreading under actual field conditions. *Int. Conf. on Atmospheric Ammonia - Emissions, Deposition and Environmental Impacts*, October 02-04, 1995, Culham, England, *Atmospheric Environment* 32 (3) 279-284.
- Guerrin, F., 2001. Magma: A model to help manage animal wastes at the farm level. *Comput. Electron. Agr.* 33, 35-54.
- Guerrin, F., 2004. Simulation of stock control policies in a two-stage production system application to pig slurry management involving multiple farms. *Comput. Electron. Agr.* 45, 27-50.
- Guerrin, F., Médoc, J.-M., 2005. A simulation approach to evaluate supply policies of a pig slurry treatment plant by multiple farms. *EFITA/WCCA 2005 Joint Conference, Vila Real (Portugal)*, July 25-28 2005. Paper # B03.3/PA 305.
- Levasseur, P., 1999. Mieux connaître les lisiers de porc. *Compositions, volumes et analyses.* Institut Technique du Porc, Paris, 32 p.
- Lopez-Ridaura, S., Guerrin, F., Paillat, J.M., van der Werf, H., Morvan, T., 2007. Agronomic and environmental evaluation of collective manure management for a group of farms. *Farming Systems Design 2007: An international symposium on methodologies for integrated analysis of farm production systems*, Catania, Italy, 10-12 September 2007.
- Lopez-Ridaura, S., van der Werf, H.M.G., Paillat, J.-M., Le Bris, B., 2008. Environmental evaluation of transfer and treatment of excess pig slurry by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, In Press.
- Loyon, L., Guiziou, F., Beline, F., Peu, P. 2007. Gaseous emissions (NH₃, N₂O, CH₄ and CO₂) from the aerobic treatment of piggery slurry - Comparison with conventional storage system. *Biosyst. Eng.* 97, 472-480.
- Misselbrook, T.H., Smith, K.A., Johnson, R.A., Pain, B.F., 2002. Slurry application techniques to reduce ammonia emissions: Results of some UK field-scale experiments. *Biosyst. Eng.* 81, 313-321.
- Morvan, T., 1999. Quantification et modélisation des flux d'azote résultant de l'épandage de lisier. Thèse université Paris 6, 146 p.
- Morvan, T., Leterme, P., 2001. Vers une prévision opérationnelle des flux de N résultant de l'épandage de lisier : paramétrage d'un modèle dynamique de simulation des transformations de l'azote des lisiers (STAL). *Ingénieries* 26, 17-26.
- Morvan, T., Leterme, P., Arsene, G.G., Mary, B., 1997. Nitrogen transformations after the spreading of pig slurry on bare soil and ryegrass using N-15-labelled ammonium. *Eur. J. Agr.* 7 (1-3) 181-188.
- Pelletier, F., Godbout, S., Larouche, J.P., Lemay, S., Marquis, A., 2006. Ammonia emissions from swine manure storage tank. *Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-Farm Perspective. Vol. II. 12th Ramiran International conference.* DIAS report Plant production 123, 249-252.
- Pinel, O., 2005. Plan d'épandage de lisier de porcs du GIE Terre Eau - Législation des installations classées. Alcyon - ARCA, Chateaubourg, France, 200 p.+ annexes.
- Savelli, E., Cebren, D., 2006. La Bretagne : Première région agricole en France. *Bretagne Environnement : Réseau d'information sur l'environnement en Bretagne.* available at: <http://www.bretagne-environnement.org/article/agriculture> Accessed 5/12/06.