

Estimation des flux d'azote et de carbone des systèmes de culture de neuf exploitations porcines du Grand Ouest de la France

Aurore LOUSSOUARN (1), Nouraya AKKAL-CORFINI (2), Virginie PARNAUDEAU (2), Coline BRAME (1), Michael S. CORSON (2), Anne GUEZENGAR (1), Bertrand DECOOPMAN (1), Safya MENASSERI-AUBRY (2)

(1) Chambre d'agriculture de Bretagne, Rond-Point Maurice Le Lannou, 35042 Rennes Cedex, France

(2) INRA, Agrocampus Ouest, UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, 65 rue de Saint Briec, 35042 Rennes Cedex, France

aurore.loussouarn@bretagne.chambagri.fr

Cette étude a été réalisée avec la contribution financière de l'ADEME dans le cadre du projet ETYC.

Estimation des flux d'azote et de carbone des systèmes de culture de neuf exploitations porcines du Grand Ouest de la France

Les flux d'azote et de carbone générés dans les systèmes de culture de neuf exploitations porcines du grand Ouest de la France ont été estimés. Les exploitations ont été sélectionnées selon la nature des produits organiques utilisés (lisier, fumier, digestat). L'objectif est de déterminer (1) les marges de progrès possible pour limiter les pertes d'azote et favoriser le stockage de carbone dans le sol, (2) les freins à l'utilisation de bonnes pratiques. Les pertes d'azote (NH_3 , N_2O , NO_3^-) ont été évaluées grâce au modèle de simulation Syst'N, à l'échelle spatiale de la parcelle, et à l'échelle temporelle de la succession de cultures. Le devenir du carbone dans le sol a été simulé sur 20 ans, via le modèle RothC. En moyenne 40 % de l'azote épandu est perdu sous forme gazeuse (8 %) ou lessivée dans l'eau (32 %). Les pratiques des éleveurs sont déjà optimisées, mais les prédictions des modèles indiquent qu'elles peuvent encore être améliorées. Vis-à-vis des émissions d'ammoniac, la période estivale d'épandage sur colza reste la période la plus à risque. Les flux d'ammoniac pourraient être diminués de l'ordre de 18 à 25 % pour trois exploitations. Les fuites de nitrates sont plus élevées en système « fumier », mais le fumier contribue d'avantage à l'entretien du stock de carbone dans le sol. Le temps, l'organisation des chantiers d'épandage et le coût du matériel sont cités comme principaux freins à l'application de pratiques plus respectueuses de l'environnement. Ces premières prédictions obtenues en élevages mettent en avant les intérêts et limites des modèles. En effet, le recours aux modèles de simulation présente un atout pédagogique mais nécessite une expertise agronomique de l'utilisateur.

Estimation of nitrogen and carbon flows from cropping systems of nine pig farms in western France

Nitrogen and carbon flows from cropping systems in nine pig farms in western France were estimated. Pig farms were selected according to the type of manure used (slurry, solid manure, digestate). The aim of this study was to determine (1) the potential to decrease nitrogen losses and increase carbon storage in soils and (2) obstacles to the implementation of improved practices. Nitrogen losses (NH_3 , N_2O , NO_3^-) were estimated using the simulation model Syst'N, at the field scale, and at the crop rotation scale. Carbon fate in soils was simulated over 20 years using the Rothamsted Carbon Model (RothC). On average, 40% of the nitrogen applied on land is predicted to be lost to the air (8%) or leached into soil water (32%). Farmer practices are already optimized but can still be improved, according to model predictions. Concerning ammonia emissions, manure spreading in summer before rapeseed seeding is the riskiest operation. Ammonia emission could be reduced by 18-25% in three pig farms. Nitrate leaching is higher in the solid manure system, but solid manure preserves soil carbon stocks more than the slurry system. The amount of time required, organization of manure-spreading plans, and equipment costs are mentioned as the main obstacles to the application of most environmentally friendly practices. These initial predictions for pig farms highlight the utility and limits of models. The use of simulation models has instructive advantages but requires the user to have agronomic expertise.

INTRODUCTION

L'agriculture, tout comme les autres secteurs d'activité, participe à la lutte contre le réchauffement climatique. Cette action cible à la fois la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES), le stockage de carbone dans le sol et la production d'énergie renouvelable. Selon l'inventaire national 2010 des émissions françaises de GES, l'agriculture contribue à 17,8 % à ces émissions, dont 9,8 % sous forme de protoxyde d'azote (N₂O) et 8,0 % sous forme de méthane (CH₄ - Pellerin *et al.*, 2013). Le N₂O provient à 35 % directement des sols agricoles, à 28 % de la lixiviation de nitrates (NO₃⁻) ou la volatilisation d'ammoniac (NH₃) et à 24 % de la gestion des déjections animales. Bien que les auteurs admettent que les marges de progrès peuvent être importantes en agriculture, les leviers d'actions sont moins bien quantifiés que pour d'autres secteurs d'activité. En effet, ces émissions sont diffuses, et mettent en jeu des processus biologiques complexes, difficiles à maîtriser.

Dix actions applicables en agriculture ont été proposées par Pellerin *et al.* (2013) pour réduire les émissions de GES. Elles visent à la fois l'alimentation des animaux du bétail, la capture du CH₄ lors du stockage des effluents, mais aussi le moindre recours aux engrais minéraux de synthèse et le stockage de carbone dans le sol et la biomasse. Ce dernier point implique notamment des techniques culturales sans labour et les cultures intermédiaires.

Afin d'identifier les pratiques des agriculteurs, leur marge de progrès possible et les freins à l'application de ces préconisations, une évaluation des flux d'azote (N) et de carbone a été réalisée à l'échelle de la parcelle, pour neuf élevages porcins. La question des gaz à effet de serre ne peut être isolée. La complexité des flux d'azote, l'état des connaissances, encore succinct concernant le N₂O, et les risques de transferts de pollution, poussent vers une analyse globale des pertes azotées. Cette étude cible donc, d'une part, les pertes d'azote sous forme de NO₃⁻, de NH₃ et de N₂O, et, d'autre part, le stockage de carbone dans les sols.

1. MATERIEL ET METHODES

Dans cette étude, il ne s'agissait pas d'obtenir un échantillon représentatif des pratiques moyennes réalisées en élevage,

ni de dresser la liste exhaustive de la diversité des pratiques culturales. L'objectif était de réaliser un travail exploratoire, par l'analyse de pratiques réellement appliquées en élevage porcine au moyen de modèles de simulation existants, et de déterminer les points forts et les points faibles de chacun de ces systèmes. Pour quelques cas, les marges de manœuvre et de progrès possibles ont été identifiées à partir de scénarios d'évolution centrés sur les pratiques d'épandage et la gestion des résidus de culture.

1.1. Neuf exploitations enquêtées

Les exploitations enquêtées ont été sélectionnées en fonction du type d'effluent géré sur l'exploitation (lisier, fumier, digestat de méthanisation - Tableau 1). L'exploitation A est la station expérimentale de Crécom (Saint-Nicolas-du-Pélem, 22), où trois systèmes de culture sont suivis depuis 2009. Ils diffèrent uniquement par leurs modalités de fertilisation (F-Fumier, L-Lisier et M-Mixte). Les huit autres exploitations sont des exploitations spécialisées en production porcine (E, H, I), ou des exploitations de polyélevage avec des ateliers porc et bovin (B, C, F, G) ou horticole (D).

1.2. Deux modèles de simulation à la parcelle

Les flux d'azote ont été évalués au moyen de Syst'N (Parnaudeau *et al.*, 2012), un modèle de simulation des pertes de nitrates dans l'eau par lessivage, de protoxyde d'azote par dénitrification et d'ammoniac par volatilisation dans l'air.

Développé dans le cadre du RMT Fertilisation & Environnement à partir de différents modèles déjà existants, Syst'N simule les flux d'azote consécutifs aux épandages à l'échelle d'une parcelle en intégrant la succession culturale. Pour cette étude, une adaptation du modèle a été nécessaire pour prendre en compte les digestats de méthanisation. Pour cela les courbes de minéralisation disponibles concernant les digestats ont été intégrées au modèle.

Les données d'entrée sont nombreuses : succession culturale, rendements, dates d'intervention et techniques utilisées (travail du sol, semis, fertilisation organique et minérale,...), caractéristiques du sol et conditions climatiques.

Les simulations Syst'N ont été réalisées sur des durées variant de 6 à 20 ans (selon les données météo disponibles).

Tableau 1 – Description des rotations culturales et des conditions pédo-climatiques des parcelles étudiées

EA*	Année de rotation (et mois : jf : janv-fév, ma : mars-avril, ...)							Région géographique	Température moyenne (°C/an)	Pluviométrie moyenne (mm/an)	% MO initial		
	1	2	3	4	5	6	7						
	ja so nd jf ma mj ja												
AF		Blé	Colza	Triticale	CI	MG		Bretagne	11,0	914	7,2		
AM		Blé	Colza	Triticale	CI	MaïsG		Bretagne	11,0	914	7,2		
AL		Colza	Triticale	CI	MaïsG	Blé		Bretagne	11,0	914	7,2		
B	CI	MaïsG	Blé	Orge	Colza			Bretagne	11,5	1231	4,8		
C	CI	MaïsG	Blé 1	Colza	Blé 2			Bretagne	11,9	693	2,4		
D		Blé	Orge 1	Triticale	MG1	MG2	Orge 2	Pays de la Loire	12,1	846	2,4		
E		Blé 1	Mout	Pois	Blé 2	Mout	MG	Bretagne	11,9	1063	5,1		
F		Prairie					MG	Blé	Bretagne	11,9	1063	4,1	
G		Blé dur	Prairie	MG1	CI	ME1	Orge	ME2	MG2	Normandie	11,8	777	2,4
H		Blé	Mout	MG1	MG2			Pays de la Loire	12,2	663	2,8		
I		CI-RG	MaïsG	Blé 1	Triticale	Colza	Blé 2	Bretagne	11,1	795	4,2		

* EA : Exploitation Agricole, CI : Culture intermédiaire, Mout : Moutarde, MG : maïs grain, ME : Maïs Ensilage, MO : Matière organique.

RothC est un modèle de simulation du devenir de la matière organique du sol (Coleman *et al.*, 1997). Il simule le turnover du carbone dans l'horizon de surface du sol (0-30 cm), après apports de différents types de produits organiques ou de résidus de cultures. Les données d'entrée sont la teneur en matière organique initiale du sol, les rendements des cultures, les apports de matières organiques animales, les restitutions végétales et les conditions climatiques. RothC a été utilisé pour simuler chaque parcelle pendant 20 ans. Pour chaque exploitation, les caractéristiques des parcelles étudiées et des effluents apportés ont été renseignées à partir des informations disponibles. Les données climatiques utilisées (température, pluviométrie, évapo-transpiration et rayonnement global) ont été recueillies auprès des stations météo les plus proches.

1.3. Diagnostic initial et scénarios d'évolution

A partir des données recueillies sur les exploitations, l'étude a été menée en deux étapes : (i) l'établissement d'un diagnostic initial des pertes d'azote moyennes annuelles et du devenir du carbone sur 20 ans pour chaque système, (ii) l'élaboration de scénarios d'évolution sur les conditions d'épandage pour les exploitations utilisant du lisier, et sur la gestion des résidus de cultures pour les unités de méthanisation (Tableau 2).

2. RESULTATS

2.1. Diversité de conduites culturales

Les pratiques culturales des agriculteurs enquêtés respectent globalement les préconisations. Pour les épandages de lisier ou de digestat, seuls trois éleveurs sur neuf utilisent une rampe à buses. L'exploitation D utilise une rampe à pendillards depuis la mise en service de l'unité de méthanisation pour les épandages de digestat, venus en substitution du lisier de porc.

Les délais d'enfouissement restent cependant encore longs : si quatre éleveurs sur neuf réussissent, dans la majorité des cas, à enfouir le jour de l'épandage (J0), il faut au moins attendre le lendemain de l'apport (J1) dans les autres cas. Le travail du sol est au maximum de 20 cm pour les neuf élevages. Seuls A et H pratiquent un labour systématique tous les ans. La station de Crécom (A), réalise un essai basé sur des systèmes économes en intrants. Le labour participe dans ce cas au désherbage. Seul l'éleveur B a mis en place un couvert permanent qui se traduit par l'absence de travail du sol et d'enfouissement des lisiers. Les autres exploitations utilisent des outils à disques ou à dents, pour un travail du sol superficiel (environ 15 cm), avec un recours occasionnel au labour, le plus souvent avant blé, voire avant maïs, soit une à deux fois dans la rotation.

Sur les parcelles étudiées, les doses d'azote apportées vont de 114 kg N/ha/an pour E dont la rotation contient du pois à 242 kg N/ha/an pour G, qui ne fertilise qu'avec de l'engrais organique.

2.2. Flux d'azote

2.2.1. Pertes dans la situation actuelle

D'après les résultats obtenus via Syst'N, en moyenne sur l'ensemble des parcelles, $39,8 \pm 15\%$ de l'azote total apporté est perdu, dont $31,9 \pm 14\%$ sous forme de NO_3^- dans l'eau (soit $79,6\%$ des pertes), $7,6 \pm 4\%$ de NH_3 ($19,6\%$) et $0,5 \pm 0,4\%$ de N_2O dans l'air ($0,8\%$). Le « N non perdu » est utilisé par la plante ou stocké dans le sol (Figure 1). Cette part d'azote total perdu, qui dépend également de la minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture, est très variable, de 17% pour l'exploitation G à 75% pour l'exploitation E. G est l'exploitation qui apporte la plus forte dose d'azote, mais avec des pratiques de fertilisation optimisées (pendillard, enfouissement le jour même, couvert hivernal,...).

Tableau 2 - Description des pratiques culturales et des scénarios d'évolution étudiés sur les parcelles retenues

EA	Type d'effluent	Dose N total (kg /ha/an)	% N organique	Matériel épandage (liquide)	Délai d'enfouissement	Fréquence labour, Profondeur (cm)	Devenir des cannes de maïs (et colza)	Devenir des pailles de céréale
Situation actuelle								
AF	Fumier	191	76	-	J1	Systématique, < 20 cm	Restituées	Exportées
AM	Lisier/Fumier	148	91	Pendillards	J0 ou J1	Systématique, < 20 cm	Restituées	Exportées
AL	Lisier	139	70	Pendillards	J0 ou J1	Systématique, < 20 cm	Restituées	Exportées
B	Lisier	161	81	Pendillards	-	Jamais	Restituées	Exportées
C	Lisier/Fumier	200	40	Pendillards	J0	Ponctuel, 25 cm	Restituées	Exportées
D	Lisier/Digestat	181	87	Buses/Pend.	J0	Jamais	Restituées	Restituées
E	Lisier	114	34	Buses	J1	Ponctuel, 20 cm	Restituées	Exportées 1/3
F	Lisier	213	95	Pendillards	-	Ponctuel, 20 cm	Restituées	Exportées
G	Lisier/Digestat	242	100	Pendillards	J0	Ponctuel, 20 cm	Restituées	Exportées
H	Lisier	218	42	Buses	J1	Systématique, 20 cm	Restituées	Exportées
I	Lisier	180	61	Pendillards	J1	Ponctuel, 20 cm	Restituées	Exportées
Scénario 1 : Optimisation des conditions d'épandage du lisier								
E1	Lisier	114	34	Pendillards	J0	Ponctuel, 20 cm	Restituées	Exportées 1/3
H1	Lisier	218	42	Pendillards	J0	Systématique, 20 cm	Restituées	Exportées
I1	Lisier	180	61	Pendillards	J0	Ponctuel, 20 cm	Restituées	Exportées
Scénario 2 : Exportation des résidus de culture vers la méthanisation								
D2	Lisier/Digestat	181	87	Buses/Pend.	J0	Jamais	Exportées	Exportées
G2	Lisier/Digestat	250	100	Pendillards	J0	Ponctuel, 20 cm	Exportées	Exportées

La pluviométrie annuelle est aussi parmi les plus faibles. E possède du pois dans la rotation, qui pèse fortement sur les pertes d'azote, notamment par lessivage sur la succession pois-blé. Notons que la pluviométrie est forte pour cet élevage. De même pour l'exploitation F, la prairie, bien

valorisée, est aussi forte source de pertes azotées, notamment en NH_3 . Les pertes sous forme de N_2O , étant très faibles, leur variabilité d'un système à l'autre sera peu étudiée dans la suite car elle peut autant provenir des différences entre systèmes que du paramétrage même de l'outil de simulation.

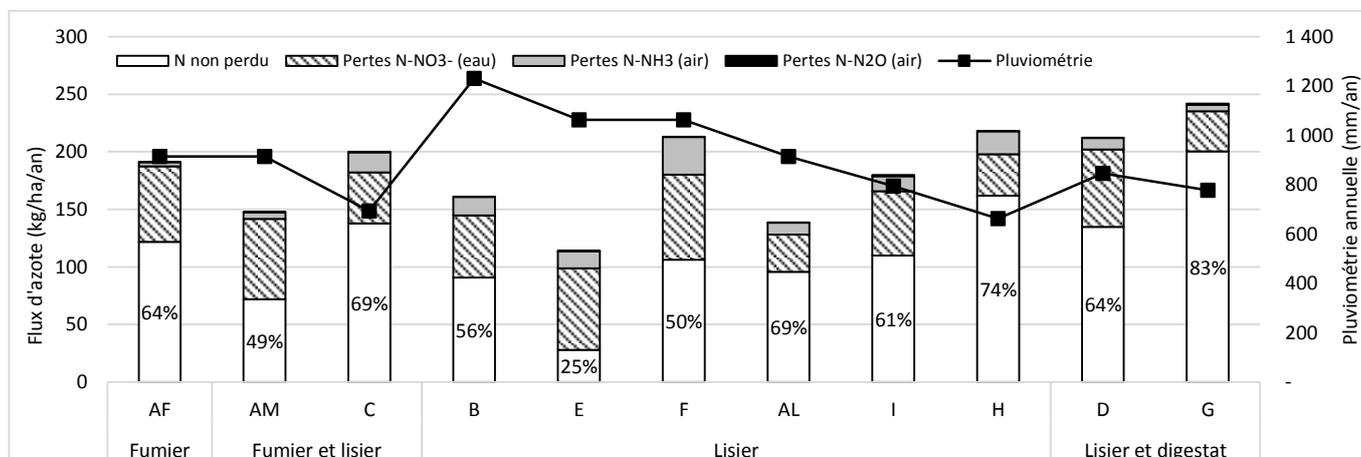


Figure 1 – Devenir de l'azote total épandu dans la situation actuelle (simulés par Syst'N-histogrammes-) et pluviométrie (trait).

Les exploitations sont classées selon la nature des effluents, puis la pluviométrie. Les pourcentages représentent la part d'azote « non perdu ».

2.2.2. Influences des caractéristiques des systèmes

Les conditions climatiques sont déterminantes. La pluviométrie élevée favorise notamment les pertes en nitrates par lessivage. Syst'N simule pour les exploitations B et I, qui ont des rotations proches, des pertes d'azote sous forme de nitrates de l'ordre de 55 kg de N-NO_3^- , sur la même période temporelle (2002-2010). Or, l'exploitation I apporte une dose plus forte et présente une céréale d'hiver en plus dans sa rotation, soit un sol peu couvert pendant la période de risque. Mais B présente une pluviométrie plus forte. Les exploitations H et G, bien que n'ayant pas de colza (cf suite) dans la rotation présentent des fuites de nitrates faibles, associées à une pluviométrie faible. Le climat influence aussi la volatilisation de NH_3 . Sur maïs par exemple, le pic de volatilisation d'ammoniac diffère d'une rotation à la suivante. Dans le cas de B, d'après Syst'N, les pertes en NH_3 avant maïs s'élèvent à environ 7 kg en avril 2003 et 22 kg en avril 2011.

La nature des effluents joue également sur les flux, comme en témoigne le suivi réalisé à Crécom. Les systèmes AF et AM utilisent du fumier pour la fertilisation du colza et du maïs, avec des arrière-effets non maîtrisables qui peuvent expliquer le lessivage plus important que dans le système AL. Notons que la différence entre AF et AM repose sur la fertilisation autre que le fumier. AM utilise du lisier de porc et de l'ammonitrate sur céréales, alors que AF utilise uniquement de l'ammonitrate. Il en résulte un lessivage plus important pour AM que AF (la rotation s'inscrit dans le même pas de temps, la comparaison est donc possible). L'exploitation C est également en fertilisation mixte, mais elle perd moins de nitrates que A. Elle n'apporte du fumier que sur maïs et utilise lisier et engrais minéral sur colza et céréales. Elle bénéficie surtout de conditions climatiques moins humides que A (693 mm/an pour C, vs 914 mm/an pour A).

La présence de colza dans la rotation favorise les pertes sous forme de NH_3 , mais limite les pertes de NO_3^- . Le colza est apprécié des agriculteurs puisqu'il permet une fertilisation en août, ce qui apporte de la souplesse dans le stockage des effluents. Le colza est connu pour être également une bonne « pompe à nitrates » en hiver. Prenons l'exemple de l'exploitation B qui réalise deux types de rotation, l'une avec colza (B) et l'autre sans colza (B « sans colza » - Tableau 3).

Dans ce cas, la présence du colza dans la rotation permet de diminuer les pertes sous forme de nitrates de 20 % en moyenne par an sur une rotation de quatre ans (soit 13 kg de conservé par an). En contrepartie, les apports de lisiers au moins d'août se traduisent par une augmentation des pertes sous forme d'ammoniac de 36 %, soit 4 kg N-NH_3 de perdu en plus par an. Notons que les conditions d'épandage pour cette exploitation sont satisfaisantes avec l'utilisation de pendillards, mais sans incorporation, puisque le système est en couvert permanent. Mais cette modalité n'est pas modélisée dans Syst'N. Les pertes de NH_3 réelles devraient être moins élevées.

Tableau 3 – Effet des pratiques culturales sur les pertes d'azote (simulés par Syst'N)

Système	N apporté (kg)	Pertes N- NO_3^- (kg)	Pertes N- NH_3 (kg)
B	161	54	16
B « sans colza »	145	67 (+25 %)	12 (-26 %)
I	180	56	13
I « sans CI »	180	73 (+30 %)	13 (0)
H	218	36	20
H « ammo »	218	42 (+17 %)	7 (-65 %)

Les % entre parenthèses indiquent la différence avec la pratique réelle.

Un autre paramètre qui pèse sur les pertes sous forme de nitrates est la présence d'une couverture du sol efficace en hiver. La simulation sur Syst'N montre que l'absence de culture intermédiaire (I « sans CI ») avant maïs amplifie dans ce cas le lessivage de nitrates de 30 % (17 kg supplémentaires de perdus), sans impact sur les flux de NH_3 et N_2O .

Enfin, le type de fertilisant minéral, plus que le mode d'épandage, a également un rôle sur les pertes sous forme de NH_3 . A l'exemple de cet éleveur H, qui utilise des solutions azotées (fertilisant liquide) et s'interroge sur l'intérêt de l'ammonitrate (granules), malgré son coût plus élevé. Les pertes sous forme de NH_3 seraient quasiment divisées par trois (de 20 kg/ha/an à 7 kg/ha/an de perdu) mais les pertes de NO_3^- augmenteraient alors de 6 kg/ha/an (42 au lieu de 36 kg).

Toutefois, l'éleveur pourrait alors diminuer la dose d'azote apportée sous forme d'ammonitrate de 10 % (à rendement constant), ce qui, bien que non testé, réduirait probablement le risque de lessivage.

Les modalités d'épandage ont un effet sur les pertes en ammoniac. Mais sur les neuf exploitations enquêtées, ce ne sont pas celles équipées d'une rampe à buses avec une incorporation différée qui perdent le plus d'ammoniac (E et H). La forme de l'engrais minéral utilisé, le type de cultures et le climat semblent conditionner davantage les pertes.

2.2.3. Scénario 1 : optimisation des conditions d'épandage

Pour les trois exploitations E, H et I, un scénario d'optimisation des conditions d'épandage a été construit. Le fractionnement des apports sur céréales, déjà appliqué, n'a pas été retravaillé. Les exploitations E et H utilisent des rampes à buses pour l'épandage et l'enfouissement a lieu au mieux le lendemain de l'apport. I utilise une rampe à pendillards, mais de la même manière ne réussit pas à enfouir rapidement les effluents. Rappelons que l'enfouissement n'est possible que pour les apports avant maïs et colza. En effet, les apports sur céréales d'hiver ont lieu lorsque la culture est déjà en place. L'amélioration des conditions d'épandage (rampe à pendillards et enfouissement systématique le jour même) permet de diminuer les émissions de NH₃ de 18 % pour E (-2,7 kg/ha/an), 24 % pour I (-3,2 kg/ha/an) et 25 % pour H (-5 kg/ha/an - Tableau 4). Cet azote perdu en moins dans l'air et incorporé au sol peut se traduire par une légère amplification des pertes sous forme de nitrates (+2 % pour I et +8 % pour H).

Tableau 4 - Effet de l'adaptation des pratiques d'épandage sur les pertes en azote (simulé par Syst'N)

Système	Pertes N-NO ₃ ⁻ (kg)	Pertes N-NH ₃ (kg)
E	71	15
E1 « optimisation épandage »	71 (0)	12 (-18 %)
H	36	20
H1 « optimisation épandage »	39 (+8 %)	15(-25 %)
I	56	13
I1 « optimisation épandage »	57 (+2 %)	10 (-24 %)

Les % entre parenthèses indiquent la différence avec la pratique réelle.

2.3. Flux de carbone

2.3.1. Evolution du stock de carbone sur 20 ans

Le stock de carbone initial est calculé dans RothC à partir de la teneur en carbone organique du sol, de la masse volumique du sol et de la profondeur étudiée. L'outil simule ensuite l'évolution du stock sur 20 ans (Figure 2). La dynamique d'évolution est fortement dépendante de l'état initial. Toutes les parcelles ayant un taux de matière organique supérieur à 3 % ont tendance à déstocker du carbone, alors qu'en deçà de ce seuil, l'évolution est inversée. Seule l'exploitation F se démarque, par un stockage de carbone de +11 %.

2.3.2. Influence des caractéristiques des systèmes

Comme en témoigne la station de Crécom, la fertilisation à base de fumier (AF), plus riche en matière organique qu'un lisier, permet d'entretenir davantage le stock de carbone dans le sol. Ainsi sur 20 ans, AF et AM déstockent respectivement 2 % et 3 % de carbone et AL, 10 %. Notons que la rotation étudiée fait suite à une prairie. Le taux de matière organique initial est donc très élevé (7,2 %), ce qui explique la dynamique observée, même pour une fertilisation à base de fumier.

F a tendance à stocker du carbone grâce à la présence de la prairie, ce qui la démarque des autres rotations. Mais la restitution des cannes de maïs participe davantage que les cinq ans de prairie à l'augmentation du stock de carbone.

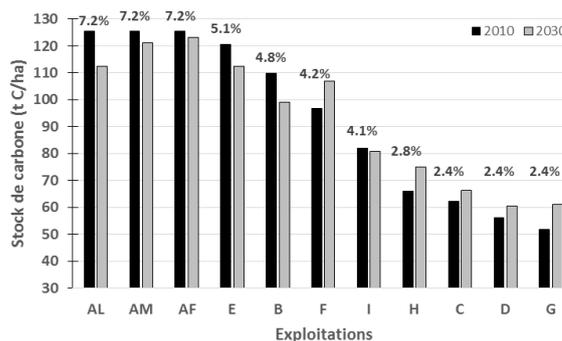


Figure 2 - Evolution du stock de carbone sur 20 ans (simulée par RothC). Les % correspondent au taux de matière organique initial.

2.3.3. Scénario 2 : Exportation des résidus de culture

Pour les exploitations D et G, l'hypothèse d'une utilisation des résidus de culture en méthanisation a été simulée. En exportant vers la méthanisation les cannes de maïs et les pailles de céréales, dont l'avoine utilisée comme couvert hivernal entre deux maïs, D passe d'une tendance de stockage (+8 %) de carbone à une tendance au déstockage (-4 %). La dynamique reste positive (stockage) si les cannes ne sont exportées qu'une fois sur deux. En exportant les cannes de maïs (les pailles étaient déjà exportées), G reste dans une dynamique de stockage de carbone (passage de +18 % à +8 %).

Tableau 5 : Effet de l'exportation des résidus de cultures sur le stockage de carbone dans le sol (simulé par RothC).

Système	Stock C 2010 (t/ha)	Stock C 2030 (t/ha)
D	56	60 (+8 %)
D2 « export résidus »	56	54 (-4 %)
G	52	61 (+18 %)
G2 « export résidus »	52	56 (+8 %)

Les % indiquent la différence de stock par rapport à 2010.

3. DISCUSSION

3.1. Atouts et faiblesses des systèmes de culture porcins

Les systèmes de cultures rencontrés dans les exploitations porcines étudiées sont en accord avec la typologie mise en avant par Tersiguel *et al.* (2012). Ils se composent majoritairement de céréales d'hiver et de maïs. Le colza est souvent utilisé pour valoriser le lisier en période estivale. L'étude menée confirme les points forts et points faibles de ces rotations. Le risque de lessivage de nitrates est faible sous colza mais fort sous céréales d'hiver. Le rôle des cultures intermédiaires, connues pour limiter le risque de fuite de nitrates, est confirmé dans nos simulations. Les épandages les plus sensibles à la volatilisation de l'ammoniac ont lieu en été sur colza et en avril sur maïs.

3.2. Des freins à lever pour améliorer encore les pratiques

Au regard des actions identifiées par l'INRA (Pellerin *et al.*, 2013) pour limiter le réchauffement climatique, les actions qui concernent en premier lieu les éleveurs dans la conduite de leur système de culture sont : le moindre recours aux engrais minéraux, l'abandon du labour et les couverts en hiver.

Les élevages retenus pour l'étude optimisent déjà ces paramètres et leurs marges de manœuvre sont donc limitées. Les engrais minéraux sont principalement utilisés sur céréales lorsque les apports organiques ne sont pas possibles, ou bien dans les exploitations produisant uniquement du fumier. Les perspectives d'amélioration sont donc réduites, sauf en cas de surdosage, non rencontré dans notre étude. Le labour profond (supérieur à 25 cm) n'est pratiqué par aucun éleveur interrogé. Les outils à disques et à dents, plus favorables à l'entretien du stock de carbone que la charrue à versoir (Heddadj *et al.*, 2014) sont déjà présents dans les élevages et systématiquement utilisés pour l'enfouissement des résidus de culture ou des déjections animales. Enfin la couverture du sol en hiver doit être gérée de façon efficace pour piéger l'azote à l'automne (ex. conditions de levée, espèce).

L'amélioration des pratiques ciblera prioritairement la volatilisation de l'azote à l'épandage. Pour trois exploitations, les émissions pourraient, d'après Syst'N, être réduites de 18 à 25 % par l'utilisation de pendillards et l'enfouissement immédiat. Les éleveurs sont sensibilisés sur les pertes à l'épandage mais soulignent eux-mêmes les freins techniques, économiques et organisationnels à la mise en œuvre de meilleures pratiques. Une rampe à pendillards de 12 m, équipée d'un broyeur, coûte deux fois plus cher qu'une rampe à buses de même longueur (21 500 € vs 9 900 € - APCA, 2015). Les éleveurs préfèrent disposer de leur propre matériel d'épandage pour être plus autonomes et s'adapter aux conditions climatiques. Il est alors difficile d'assurer dans une même journée les épandages et l'enfouissement. Seuls les éleveurs faisant appel à un entrepreneur ou une CUMA pour l'épandage peuvent mettre à profit le temps gagné pour incorporer directement les effluents.

3.3. Intérêts et limites des outils de simulation employés

Bien que Pacaud et Pradel (2010) soulignent le lien entre les doses d'azote apportées et les flux observés, notre étude ne met pas clairement en évidence cette relation. Pour des doses apportées respectueuses de l'équilibre de la fertilisation, d'autres paramètres, telles que les conditions climatiques, les caractéristiques de la rotation, la forme de l'azote et les pratiques culturales, peuvent expliquer les différences observées. Toutefois le poids de chaque facteur est difficile à estimer et varie d'une exploitation à l'autre. Une étude en soi serait nécessaire pour discriminer et hiérarchiser l'effet de chaque paramètre, ce qui n'a pas été traité ici.

Les modèles de simulation sont en revanche particulièrement adaptés au conseil individuel.

A partir d'un diagnostic de départ, il est possible d'identifier les marges de progrès dans un système donné. Dans cette optique, nous soulignerons la facilité d'utilisation de Syst'N et sa restitution pédagogique des résultats. Le travail mené a cependant nécessité en parallèle quelques adaptations des modèles de simulation utilisés. Ainsi, la minéralisation a été paramétrée initialement dans Syst'N à partir des sols du bassin parisien, peu riches en matière organique et des ajustements ont été nécessaires pour adapter le modèle aux sols bretons. De même, les digestats de méthanisation ont été ajoutés dans Syst'N pour les besoins de cette étude, mobilisant des courbes de minéralisation de l'azote organique encore peu nombreuses. Il semble donc encore prématuré de généraliser les résultats concernant ces digestats, leur prise en compte doit encore être améliorée.

Malheureusement, l'effet des techniques de travail du sol sur l'évolution du stock de carbone et les pertes d'azote n'a pas pu être étudié. Le couvert permanent (B) n'est pas encore intégré dans Syst'N, et RothC, de façon surprenante, ne tient pas compte de la profondeur de travail du sol. La bibliographie à ce sujet est d'ailleurs encore incertaine et la question complexe : les techniques simplifiées permettent de limiter la minéralisation en surface mais parfois au détriment du stock de carbone en profondeur.

CONCLUSION

Les neuf élevages porcins étudiés ont globalement de bonnes pratiques culturales, intégrant les intercultures et des techniques de travail du sol alternatives, même si le labour est encore présent. Les conditions d'épandage peuvent encore être améliorées (diminution des pertes de NH_3 de 18 à 25 %) mais à condition de pouvoir s'équiper individuellement ou organiser les chantiers d'épandage en déléguant une partie des tâches. Syst'N évalue les pertes totales ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_3 + \text{N}_2\text{O}$) à en moyenne 40 % de l'azote apporté. Au-delà de l'impact des conditions climatiques, les points de vigilance sont les pertes d'ammoniac lors des épandages avant colza et maïs et les fuites de nitrates sous céréales d'hiver. D'après RothC, les sols étudiés ont tendance à déstocker du carbone sur 20 ans, sauf si le taux de matière organique est inférieur à 3 %.

L'utilisation de modèles de simulation présente un atout pédagogique mais nécessite une expertise agronomique de l'utilisateur. Leur utilisation en routine nécessite encore quelques adaptations. Des analyses sur le terrain seraient notamment à réaliser en parallèle des simulations obtenues pour confirmer la fiabilité des modèles. Nous remercions les éleveurs ayant répondu à cette enquête.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- APCA, 2015. Matériels Agricoles. Les coûts 2015. Version du 21 juillet 2015, 60 p.
- Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klír J., Körschens M.K., Poulton P.R., Richter D.D., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma* n° 81, 29-44.
- Heddadj D., Bouvier D., Cotinet P., Guil J., Lebossé D., Le Roux L., Turlin J.P., Pérès G., Corson M., Hallaire V., Ménasseri S., Hoeffner K., Pulleman M., Faber J., 2014. Techniques culturales sans labour. Guide pratique, 44 p.
- Pacaud T. & Pradel M., 2010. Volatilisation de l'ammoniac et épandage de fertilisants minéraux et organiques. Etat des lieux des connaissances et perspectives de recherches, 122 p.
- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p.
- Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P., 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques* 21, 59-70.
- Tersiguel E., Ramonet Y., Giteau J.L., Martel G., 2012. Déterminants du choix de l'assolement par les éleveurs de porcs en Bretagne. *Journées Rech. Porcine*, 44, 103-108.