

Améliorer la caractérisation des effluents d'élevage par des méthodes et des modèles innovants pour une meilleure prise en compte agronomique

Butler F.¹, Heurtaux M.¹, Trochard R.², Decoopman B.³, Dezat E.³, Loussouarn A.³, Thuriès L.⁴, Charpiot A.⁵, Lorinquer E.⁵, Lvasseur P.⁶, Aubert C.⁷, Machet J.-M.⁸, Morvan T.⁹, Parnaudeau V.⁹, Denoroy P.¹⁰, Dieudé-Fauvel E.¹¹, Damay N.¹², Le Roux C.¹² (tous premiers auteurs d'importance équivalente, cités par ordre alphabétique de leurs organismes d'appartenance)

Avec la collaboration de M. Bisiaux¹², E. de Chezelles¹, D. du Clary¹³, H. Ducept¹², J. Gaillard¹², J. Gogibus¹², L. Lejars¹⁴, A. Raveneau¹⁵, S. Trupin², M. Valé¹⁶

- ¹ ACTA, le réseau des instituts des filières animales et végétales, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12
- ² Arvalis-institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin, 75116 Paris
- ³ Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Maison de l'agriculture, ZAC Atalante Champeaux, Rond-point Maurice Le Lannou CS 74223, 35042 Rennes Cedex
- ⁴ Cirad de La Réunion, UR Recyclage et Risque, BP 20, 97408 St Denis Messagerie Cedex 9
- ⁵ Institut de l'Élevage, Monvoisin BP 85225, 35652 Le Rheu
- ⁶ IFIP-Institut du Porc, 3/5 rue Lespagnol, 75020 Paris
- ⁷ ITAVI (Institut Technique de l'Aviculture), 7 rue du Faubourg Poissonnière, 75009 Paris
- ⁸ INRA, UPR AgrolImpact, Laon Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes, 02000 Barenton-Bugny
- ⁹ INRA, UMR SAS (Sol Agro et hydrosystèmes Spatialisation), 65 route de St Brieuc CS 84215, 35042 Rennes Cedex
- ¹⁰ INRA, UMR INRA-Bordeaux Science Agro TCEM, Centre de Recherches de Bordeaux Aquitaine, 71 avenue Edouard Bourloux, CS 20032, 33882 Villenave d'Ornon Cedex
- ¹¹ Irstea (ex-Cemagref), UR TSCF, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre
- ¹² LDAR (Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche), Pôle du Griffon, 180 rue Pierre Gilles de Gennes, Barenton-Bugny, 02007 Laon Cedex
- ¹³ Chambre d'Agriculture de Vendée, 21 bd Réaumur, 85000 La Roche-sur-Yon
- ¹⁴ Chambre d'Agriculture du Loiret, 13 avenue des Droits de l'Homme, 45921 Orléans Cedex 9
- ¹⁵ Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, 9 rue de la Vologne, 54524 Laxou Cedex
- ¹⁶ SAS Laboratoire, 270 avenue de la Pomme de Pin, 45160 Ardon

Correspondance : mathilde.heurtaux@acta.asso.fr

Résumé

Le projet "Effluents d'élevage" avait pour finalité de contribuer à optimiser les épandages d'effluents d'élevage pour la fertilisation des cultures par une meilleure connaissance de leur composition et de leur comportement à l'épandage. Il a permis de mieux évaluer les besoins de caractérisation, de caractériser les effluents d'élevages, y compris ceux issus des nouveaux procédés de traitement, et de tester des méthodes innovantes de caractérisation telles que la Spectroscopie Proche Infra Rouge.

Mots-clés : caractérisation des effluents d'élevage, modélisation de la composition, SPIR, nouvelles références, amélioration des outils

Abstract: Improving livestock effluents characterization by innovating methods and models for a better agronomic assessment

The project "Manure" was intended to contribute to optimize the spreading of livestock manure for fertilization of crops by a better knowledge of their composition and their spreading behaviour. It allowed to better assess the needs of characterization, to characterize different types of manure, including those

from the new methods for treating effluents, and test innovative methods of characterization such as the near Infra red spectroscopy.

Keywords: livestock effluents characterization, composition modelling, NIRS, new references, tools enhancement

Introduction : contexte et objectifs

Des effluents d'élevage largement utilisés mais mal caractérisés

Les effluents d'élevage représentent 95 % des produits résiduels organiques (PRO) épandus sur les sols français, à la fois dans les régions d'élevage et, de plus en plus, dans les régions de grandes cultures où ils présentent un intérêt croissant pour les agriculteurs comme fertilisants et amendements. Cependant, leurs caractéristiques agronomiques (composition) sont insuffisamment connues et référencées. Les appellations courantes telles que fumier, lisier ou compost dissimulent une grande diversité d'effluents d'élevage, des points de vue de leur origine, composition, modalité de traitement et d'épandage, ces facteurs influençant leur comportement dans les sols. Du fait de cette diversité, des écarts notables peuvent apparaître entre les effets observés et ceux attendus sur la base de caractérisation inadéquate.

Il apparaît donc nécessaire de pouvoir associer à une dénomination précise, une composition et un comportement du produit organique à l'épandage et dans le sol, sur la base des spécificités des élevages, en particulier les systèmes d'alimentation, les conditions d'élevage, le traitement des effluents, les conditions de stockage, etc.

Des besoins en paramétrage des outils

Les outils d'aide à la décision (OAD) développés au sein du Réseau Mixte Technologique (RMT) « Fertilisation et Environnement » pour le raisonnement de la fertilisation et/ou l'évaluation des impacts environnementaux requièrent parfois une caractérisation des produits organiques qualitativement différente et plus complète que les caractérisations classiques relatives à la composition. Ils nécessitent des paramètres permettant de prédire précisément les cinétiques de minéralisation. Afin de guider les efforts à développer sur la caractérisation de produits, le projet a débuté par une analyse de sensibilité d'OAD.

Des méthodes innovantes à tester pour la prédiction de la composition

L'intérêt de l'analyse des produits organiques au laboratoire se heurte à la question délicate du prélèvement et de la représentativité des échantillons. Pour s'affranchir de ces difficultés, le projet s'est proposé de tester deux méthodes innovantes de prédiction de la composition des effluents d'élevage :

- **la modélisation** : il s'agit de combiner différentes approches (analyses, typologie...) pour modéliser les caractéristiques des effluents à la sortie du bâtiment et après stockage, en lien avec les systèmes d'élevage (type de bâtiment, modes d'alimentation et d'abreuvement, nature de la litière...) afin de pouvoir évaluer la composition chimique des effluents d'élevage ;
- **la Spectroscopie Proche Infra Rouge (SPIR)** : le projet a testé cette méthode innovante sur le terrain et au laboratoire pour déterminer les paramètres de composition chimique et biochimique des effluents, en la confrontant aux tables existantes, aux modèles et aux mesures chimiques classiques.

Un projet aux objectifs ambitieux

Au regard de ce contexte, le projet « Effluents d'élevage » visait les objectifs suivants :

- améliorer la caractérisation des effluents par (i) la prédiction de leur composition *via* la modélisation à partir d'informations sur les caractéristiques de l'élevage d'une part, et la mise au point d'une

méthode d'analyse rapide des effluents, la Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR) d'autre part, (ii) par une meilleure connaissance de leur aptitude à l'épandage ;

- acquérir de nouvelles références en termes de composition et d'épandabilité sur les effluents peu connus, amenés à se développer dans le contexte actuel des filières ;
- mieux prendre en compte la diversité de composition des effluents dans les outils opérationnels de raisonnement de fertilisation et d'évaluation des impacts environnementaux : intégrer les connaissances acquises dans les outils et modèles portés par les RMT « Fertilisation & environnement » et « Elevages & environnement » (AzoFert®, Régifert®, Syst'N®), et ceux des partenaires du projet (Planilis®) ;
- transférer les connaissances acquises aux professionnels utilisateurs d'effluents d'élevage, prescripteurs de conseils (agriculteurs et techniciens) et formateurs en agronomie, promouvoir les produits organiques issus des élevages à destination des agriculteurs non producteurs (céréaliers).

Un projet articulé autour de quatre volets complémentaires

16 partenaires se sont associés pour répondre à ces objectifs : l'ACTA, l'Institut de l'élevage, l'IFIP, l'ITAVI, Arvalis-Institut du végétal, l'INRA (UMR de Rennes-Quimper, de Laon et de Bordeaux), Irstea (ex-Cemagref), le Cirad de l'Île de la Réunion, le Laboratoire d'analyses et de recherche de l'Aisne, SAS Laboratoire et les chambres d'Agriculture de Bretagne, du Loiret, de Vendée et de Lorraine. Leur programme de travail était organisé selon quatre volets complémentaires :

Volet 1 : Hiérarchisation des critères nécessaires pour décrire les effluents d'élevage suivant les besoins des outils de raisonnement de la fertilisation ou d'évaluation d'impacts environnementaux

Volet 2 : Prédiction de la composition et de l'épandabilité des effluents d'élevage ; modélisation de la caractérisation des produits et applications de la Spectrométrie proche infrarouge (SPIR)

Volet 3 : Etude de produits issus de bâtiments innovants ou de nouveaux procédés de traitement

Volet 4 : Valorisation de la caractérisation des effluents dans les outils de gestion de la fertilisation.

Les 16 partenaires du projet se sont partagés les tâches afférentes à chacun de ces volets.

1. Définition des besoins des outils en termes de caractérisation des effluents d'élevage

1.1 Objectifs et méthode : analyse de sensibilité de quatre outils

Le volet 1 du projet visait à évaluer la sensibilité des sorties des OAD aux paramètres décrivant les effluents d'élevage, afin de déterminer le niveau d'information et de précision requis par ces outils et hiérarchiser les efforts à mener pour améliorer la caractérisation des effluents.

Ce volet a été coordonné par le Laboratoire départemental d'analyse et de recherche de l'Aisne et l'INRA de Rennes. Leurs partenaires étaient l'INRA de Laon, l'INRA de Bordeaux et Arvalis.

Quatre outils ont été concernés par cette analyse de sensibilité :

- AzoFert® (Machet *et al.*, 2007 ; Machet *et al.*, 2008) : logiciel de préconisation de la fertilisation azotée selon la méthode du bilan dynamique aux échelles parcellaire et annuelle.
- Syst'N® (Parnaudeau *et al.*, 2009 ; Parnaudeau *et al.*, 2011 ; Reau *et al.*, 2011) : outil de diagnostic environnemental pour l'azote dans les systèmes de culture : évaluation des pertes gazeuses et en solution, à échelle multi-annuelle et pour des parcelles ou groupes de parcelles.
- Planilis® : outil d'interprétation des analyses de terre P-K-Mg pour le calcul de la fertilisation suivant la méthode "grille Comifer", développé par Arvalis.
- RégiFert® (Denoroy *et al.*, 2004 ; Denoroy *et al.*, 2007a ; Dubrulle *et al.*, 2007 ; Denoroy *et al.*, 2007b) : outil d'interprétation des analyses de terre pour la gestion de la matière organique des sols (MOS), du statut acido-basique (SAB), des éléments nutritifs P-K-Mg et des oligo-éléments B-Cu-Mn-Zn.

5 produits-type largement répandus ont été choisis pour ces travaux : fumier de bovin « jeune » ou « pailleux », fumier de bovin « stocké » ou « décomposé », lisier de porc, fientes de volailles et fumier de volailles. La gamme de variation des paramètres a été déterminée sur la base des données fournies par les instituts techniques spécialisés en élevage et de données bibliographiques.

L'analyse de sensibilité a porté sur des variables d'entrée relatives aux effluents suivant des pratiques d'épandage (doses, dates), et sur certains paramètres de calcul.

Les détails de la procédure d'analyse de sensibilité ont été adaptés aux spécificités de chaque outil, mais pour une homogénéité de l'étude, des combinaisons communes aux différents outils : sol (1 à 3) × climat (4 sites × 2 années contrastées) × cultures (successions-types) contrastées et réalistes, ont été sélectionnées pour tester les outils dans des conditions variées.

1.2 Résultats obtenus pour chacun des quatre outils

1.2.1 AzoFert®

L'analyse de sensibilité d'AzoFert® a porté sur (i) le poste des contributions en azote des produits organiques exogènes (Ma) et (ii) la dose d'engrais minéral à apporter calculée (X), en travaillant sur les variables explicatives suivantes : la dose d'apport du produit organique, et ses teneurs en azote organique, en azote minéral et en carbone organique.

Il en ressort que :

- l'époque d'apport du produit organique a un effet majeur sur la sensibilité du poste des contributions organiques (Ma),
- le poste (Ma) représente la majorité de la variabilité du poste X,
- la sensibilité à la dose d'apport du produit est d'autant plus importante que le produit est riche en azote,
- la sensibilité à la teneur en azote organique ou minéral est d'autant plus importante que le produit est pauvre en azote,
- la sensibilité à la teneur en carbone organique est très faible (X) voire nulle (Ma).

1.2.2 Syst'N®

Le simulateur de pertes d'azote inclus dans l'outil Syst'N® est un modèle dynamique de cultures, simulant les différents flux du cycle de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère. Le modèle effectue les calculs au pas de temps journalier et permet de simuler une succession de cultures. Deux types d'analyse de sensibilité ont été réalisées pour Syst'N® : l'une en particulier sur le module « minéralisation des effluents », et l'autre sur l'outil « complet ».

La différence de sensibilité aux entrées entre les différents types d'effluents est due à la teneur en N total, la teneur en N-NH₄⁺ qui induit un apport de N immédiatement disponible, pour les cultures ou la lixiviation, et la cinétique de minéralisation des effluents qui induit une disponibilité de l'azote organique plus ou moins intense mais aussi plus ou moins rapide dans le temps. Comme pour AzoFert®, les effluents présentant les teneurs les plus élevées sont ceux qui sont les plus sensibles à la dose. Plus la teneur des effluents en N total est faible, plus le degré de précision de cette teneur est important.

Pour les apports de printemps, la sortie lixiviation ne semble globalement pas très sensible aux entrées : dans la gamme de variation testée, la culture continue à absorber l'azote issu des effluents. Il sera donc ultérieurement opportun de vérifier le comportement de l'absorption pour des valeurs élevées d'apport d'azote afin de déterminer s'il est nécessaire de modifier le modèle de croissance et d'absorption des cultures. En revanche, pour les apports de fin d'été, un accroissement de la quantité apportée a peu d'effet sur la croissance de la culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN) implantée mais génère une importante variation de la lixiviation.

Une comparaison plus méthodique devrait être réalisée pour cet outil, pour estimer le besoin de regrouper ou de scinder certains types d'effluents. Pour le fumier de bovin (FB) par exemple, les résultats montrent que les pertes d'azote lessivées sont peu différentes entre FB pailleux (FBP) et FB

stocké (FBS) à teneur en N égale ; cependant, les deux catégories semblent nécessaires car les valeurs de teneurs en N des effluents proposées par défaut aux utilisateurs dans le catalogue de type de PRO varient entre FBP et FBS.

1.2.3 Planilis®

L'analyse de sensibilité de Planilis® a consisté à calculer pour chacune des situations de sol et de rotation, le conseil de fumure en P₂O₅, K₂O et MgO en faisant varier la teneur en éléments du sol (2 valeurs retenues) et des produits (3 teneurs retenues).

Les variations de doses conseillées par Planilis® en fonction de la variation de teneur des PRO sont peu tributaires des situations étudiées (climats, sols, rotations) mais fortement liées aux produits organiques utilisés. En général, plus la teneur en un élément est faible, plus elle doit être connue avec précision puisque la variation de la dose complémentaire liée à la variation de teneur est beaucoup plus rapide pour les faibles concentrations que pour les concentrations élevées.

Cet affinement de la nomenclature pourra se faire à l'aide du calculateur (cf. § 2) pour déterminer les facteurs de variation les plus pertinents à prendre en compte. Les autres produits (fientes, fumier de volailles et lisier de porcs) ne nécessitent pas le même investissement dans l'amélioration de la connaissance des teneurs, en particulier pour MgO.

1.2.4 RégiFert®

Les résultats de l'analyse de sensibilité de RégiFert® montrent que :

- par grande famille de produits, une meilleure connaissance du taux de matière sèche sera une voie simple d'amélioration de la prévision de la quantité d'apport de nutriments et de C ;
- les coefficients isohumiques doivent encore être précisés ;
- comme pour Planilis®, les efforts de caractérisation des taux de nutriments (P, K, Mg) sont particulièrement cruciaux dans le cas de produits peu concentrés puisque l'incertitude relative de l'apport est alors la plus importante.

Ainsi, la constitution d'un catalogue d'effluents, avec leurs caractéristiques, semble finalement plus simple et suffisante pour les besoins d'un outil d'interprétation d'analyses de terre. L'important est l'aspect partagé de ce catalogue, ce qui sous-entend des définitions explicites des produits et le choix partagé de paramètres descriptifs (cf. Planilis®).

1.3 Conclusion et perspectives

Les objectifs et modes de fonctionnement étant différents selon les outils, une synthèse de ces analyses de sensibilité n'est pas faisable. Seule une conclusion commune peut être tirée pour les outils les plus proches, Planilis® et RégiFert®, pour lesquels il est indispensable de préciser les teneurs sur des effluents peu concentrés car une incertitude sur les teneurs a un impact plus important sur les résultats.

En définitive, des enseignements ont été tirés pour une meilleure prise en compte des effluents dans les outils. Les analyses de sensibilité des différents outils ont permis de préciser l'impact des données d'entrée relatives aux effluents d'élevage sur les sorties des différents outils. La méthodologie mise en place pour AzoFert® pourra être adaptée afin d'étudier les variables discrètes. Afin de compléter le travail, des variations simultanées de plusieurs paramètres pourront être effectuées pour analyser les liens entre les différents paramètres. La méthodologie mise au point dans le projet peut aussi être utilisée pour analyser l'impact des données météorologiques et mieux comprendre l'effet du climat.

2. Modèle de prédiction de la composition des effluents d'élevage

2.1 Objectifs et méthode : élaboration d'un calculateur

Dans le cadre du volet 2 visant la prédiction de la composition et de l'épandabilité des effluents d'élevage, le sous-volet 2.1 était consacré à l'élaboration d'un modèle de simulation de composition des

effluents porcins, bovins et avicoles destinés à l'épandage. Ce sous-volet a été coordonné par l'IFIP et l'Institut de l'Élevage, en partenariat avec l'ITAVI.

Ce calculateur, destiné au développement agricole, s'appuie notamment sur les références, typologies et modèles de recherche existants (MELODIE, MOLDAVI). Il vise à prédire la composition des effluents en fonction de différents critères (type d'animaux, alimentation, mode de logement, etc.). Cet outil doit permettre de s'affranchir des analyses de déjections, dont la variabilité importante, due notamment aux difficultés d'échantillonnage, a été démontrée par plusieurs études.

Après inventaire des données existantes, le calculateur a été construit en y intégrant des modules existants (rejets en azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc par un élevage de porcs, de bovins ou de volailles) et en développant d'autres (matière sèche, matière organique et carbone, volumes ou masses d'effluents produits).

2.2 Résultats obtenus : Composim et ses documents d'accompagnement

« **Composim** », le calculateur de la quantité et de la composition des effluents d'élevage de porcs, bovins et volailles, est le principal résultat de ce volet. Les éléments de composition chimique sont *a minima* la matière sèche, la matière organique, le carbone, l'azote total, l'azote ammoniacal, le phosphore et le potassium. Les teneurs en cuivre et en zinc ne sont déterminées que pour les effluents porcins et avicoles. Les résultats du calculateur affichent leur quantité produite et leur concentration.

L'outil de calcul a été réalisé sous Excel, version 2007. Deux pages du calculateur sont communes aux trois filières animales : (i) la page de présentation (Figure 1) reprend les éléments sur le nombre et le type d'animaux, le mode de logement, quantité de litière apportée, la couverture des ouvrages de stockage et la localisation de l'exploitation ; et (ii) la page des résultats (Figure 2) présente par filière une estimation des quantités et de la composition des différents effluents. Des précisions complémentaires sur les caractéristiques d'élevage sont demandées pour les porcs, les bovins et les volailles *via* des onglets de saisie spécifiques.

Composim

le calculateur de la quantité et de la composition des effluents en élevage bovin, porc et volaille





Catégorie d'animaux		Quantité de litière	
Bovins	Effectif	Mode de logement	kg/animal/jour
Vache Laitière		Logette, lisier	
Vache allaitante avec son veau		Litière accumulée, couloir fumier	
Génisse (6 mois-1 an)		Litière accumulée, couloir lisier	
Génisse (1 - 2 ans)		Litière accumulée, couloir lisier	
Génisse (> 2 ans)		Etable entravée, fumier	
Bovin à l'engrais (0 - 1 an)		Pente paillée	
Bovin à l'engrais (1 - 2 ans)	Pente paillée		
Bovin à l'engrais (> 2 ans)		Etable entravée, fumier	
Porcs	Effectif	Ouvrage de stockage et/ou type de produits	t/an
Truies et verrats	100	Fumière (fumier paille frais)	
Post-sevrage	1000	Fumière (fumier paille frais)	
Porcs charcutiers	1000	Fumière (fumier paille frais)	
Espèce de Volailles	Mode de production	Effectif annuel	
Poulet de chair	Standard		Fumière (fumier paille frais)

Ville la plus proche :	Agen
Période d'épandage prévue :	Fin été/début automne
Couverture ouvrage de stockage lisier :	Oui
Couverture ouvrage de stockage fumier :	







. Adapté du CORPEN (2003) pour le calcul des rejets des porcins Version provisoire

. Fonctionne sur excel 2007

Figure 1 : Composim, page commune de saisie.

Résultats multiliériers																										
Filière/atelier	Ouvrages de destination	Intitulés produits	Quantité annuelle produits bruts	Unités	Quantité d'éléments transitant annuellement dans l'ouvrage de stockage							Concentration des effluents sur la période considérée														
					MS	MD	C	N total	N amm	P ₂ O ₅	K ₂ O	Cu	Zn	MS	MD	C	NTK	N amm	P ₂ O ₅	K ₂ O	Cu	Zn				
					t/an				kg/an			% du brut														
10	Bovins	Liquides (lisier, purin, eaux vertes, eaux blanches, eaux)	2340	m ³ /an	161	114	57	5113	-	2637	7565	-	-	6,9	4,9	2,4	2,2	0,0	1,2	3,2	-	-				
11		Solide (fumière et bout de cham)	120	t/an	27	19	10	444	-	281	732	-	-	22,1	16,2	8,1	3,7	0,0	2,3	6,1	-	-				
12	Porcins	Fosse 1	3680	m ³ /an	183	133	66	16775	11368	9048	11006	50	140	5,0	3,6	1,8	4,6	3,1	2,7	3,0	273	763				
13		Lisier/purin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
14		Lisier/purin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
15		Fumier frais paille	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
16		Compost paille	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
17	Fumière	Fumier frais sciure	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
18	Volailles	Fumière (fumier paille frais)	0	0	0	0	0	#DIV/0!	0	#N/A	-	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#N/A	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Figure 2 : Composim, onglet « Résultats ».

Un **guide méthodologique** expliquant le choix des facteurs de variation, références et équations finalement retenus accompagne ce calculateur. Trois critères principaux ont été pris en compte :

- importance de l'impact des critères sur les résultats,
- robustesse des références/équations,
- simplicité d'utilisation et caractère pratique de l'outil pour les acteurs de terrain.

Le calculateur est en outre accompagné d'une **notice d'emploi** qui doit en permettre un usage aisé même en l'absence de formation spécifique.

2.3 Conclusion et perspectives

Le calculateur permet d'estimer les quantités et la composition des principaux effluents d'élevage. Il est destiné aux conseillers en agronomie, en environnement et aux éleveurs désireux de comparer/vérifier leur propre valeur d'analyse. Il pourra faire l'objet d'amélioration en fonction des besoins et de l'évolution de l'état des connaissances. Il reste également à étudier la sensibilité de ses sorties aux paramètres des modes d'élevage, ce qui pourra permettre de simplifier la nomenclature des effluents (regroupement de produits toujours similaires), ou d'affiner la typologie utilisée dans les outils.

Le calculateur peut être utilisé dans une procédure d'analyse de sensibilité des sorties pour mettre en évidence des paramètres d'élevage pour lesquels l'information devra être connue avec précision, car déterminante vis-à-vis des caractéristiques des produits. Il pourra également être utilisé pour paramétrer des OAD (p.ex. azote ou analyse de terre) et pour constituer le catalogue des effluents en traitant à l'avance les grandes catégories correspondant aux systèmes de production régionaux.

3. Analyse de l'épandabilité des effluents d'élevage

3.1 Objectifs et méthode : atelier et synthèse bibliographique

Le sous-volet 2.2 visait à améliorer la capacité des professionnels à déterminer l'épandabilité des effluents. Cette action a été menée par Irstea (centre de Clermont-Ferrand) en partenariat avec la Chambre régionale d'agriculture de Bretagne. Faute notamment de personnel compétent disponible sur la thématique, l'élaboration d'une grille d'évaluation de l'épandabilité des effluents (outil de description de la consistance des produits) n'a finalement pas été possible, mais des informations ont été compilées sur les interactions matériau/machine et sur les pistes d'amélioration de l'épandabilité des effluents.

Partant du double constat que d'une part, il n'est pas possible de prédire le comportement d'un effluent à l'épandage à partir de sa composition, et que d'autre part, l'état actuel des connaissances et des moyens ne permet pas, dans le cadre de ce seul projet, de « prédire » l'épandabilité des effluents, ce sous-volet visait à réaliser une première avancée dans ce domaine. Aucun travail de synthèse n'ayant

été mené avant le projet sur les matériels d'épandage et surtout sur les outils de caractérisation, une synthèse bibliographique portant sur la caractérisation des effluents et leur épandage a été réalisée.

Un atelier de travail réunissant chercheurs, techniciens et professionnels a permis de décrire 15 échantillons représentatifs des effluents épandus en France, les difficultés qu'ils présentent et les machines adaptées à leur épandage (Tableau 1). La notion d'épandabilité y a été définie comme l'aptitude d'un effluent à être bien épandu d'un point de vue mécanique, avec une qualité de répartition homogène, et caractérisée par ses différents facteurs de variabilité (modalités et durée de stockage, type de transformation et de préparation...).



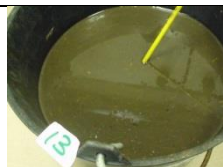
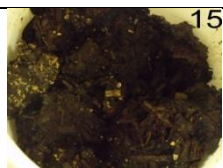
N°	Photo	Identification	Epandabilité	Caractérisation
5		Crottes de porc sans urine (avec racleur en V) légèrement paillées (5%) + ou - compostées NB : très sec ici, en réalité plus humide	Table prioritaire pour maîtriser la répartition transversale (Hérissons verticaux : tributaire des vents latéraux)	Léger, densité 0,4, sec, peu pailleux, boulettes humides au milieu, sans criblage, solide divisé grossier
10		Fumier de volaille (prélèvement en fin de bande)	Table en Hérissons verticaux : trop grande sensibilité au vent Problèmes de répartition Produit qui peut « voûter » Fume beaucoup derrière : difficile d'estimer la largeur d'épandage (6-8 m ?) Produit qui mériterait une transformation, une adaptation à la machine car forte valeur fertilisante	Fumier, hétérogène très pailleux, sec, deux composantes (paille et feuillets/plaques de déjections), léger, densité 0,25 – 0,3
13		Digestat brut liquide	Rampe à buse, malaxeur, pendillard : ça dépend Attention à la décantation Pb agronomique : N très volatile	Liquide, apparemment homogène (NB : dépôt, éléments grossiers non visibles)
15		Fumier de bovin stocké en tas : vieux fumier pourri	Hérissons verticaux Morceaux proportionnels à l'avancement : gros morceaux si vite	Pseudo-beurre noir, en mottes, hétérogène

Tableau 1 : Extrait de la grille de bilan de caractérisation de 15 échantillons, intégrant la description des effluents et les remarques faites par les professionnels concernant l'épandage.

3.2 Résultats obtenus : deux documents diffusables

Deux documents de synthèse « Description des outils de caractérisation physique des effluents d'élevage liquides, pâteux et solides » (Dieudé-Fauvel *et al.*, 2013) et « Les épandeurs d'effluents d'élevage : description des machines et des dispositifs d'épandage » (Thouzeau *et al.*, 2013) ont été rédigés. Le premier recense les techniques de caractérisation des propriétés physiques des effluents (liquides, pâteux, solides), en lien avec leur épandage. En ce qui concerne les machines, l'ensemble des techniques d'épandage existantes ont été examinées et font l'objet du second document de synthèse. Celui-ci ne fait pas une liste exhaustive des options du marché, mais décrit toutes les familles de machines d'épandage disponibles aujourd'hui (épandeurs à lisiers, à fumiers, à produits pâteux et produits pulvérulents).

Enfin, un troisième document sur **le lien matériau/matériel**, élaboré à partir de dires d'experts, de retours du terrain et de diverses observations, constitue un document de travail et de réflexion et non un

support d'information destiné aux professions agricoles. Même s'il n'est pas diffusable en l'état au grand public, il pose des bases pour une suite à ce projet et souligne l'intérêt d'intégrer l'épandage dans une approche filière, incluant les pratiques d'élevage et le devenir des effluents. La grande variabilité des effluents, des machines d'épandage et de leurs réglages, y est longuement évoquée. L'adéquation entre les matériels existants et les grands types d'effluents est discutée. De plus, un focus est réalisé non seulement sur les adaptations possibles des machines aux matériaux à épandre, mais aussi sur l'adaptation des matériaux aux machines existantes, de façon à optimiser l'épandage et son intégration tant dans les filières agricoles que d'un point de vue environnemental.

3.2 Conclusion et perspectives

Le volet « épandabilité » était secondaire dans ce projet. Comme annoncé dès le départ, il n'est pas possible de prédire l'épandabilité d'un effluent à partir de sa seule composition, ce qui empêche d'envisager d'ajouter un onglet « épandabilité » aux outils numériques dans l'état actuel des choses. Il s'agissait donc davantage de poser des bases pour un projet futur axé sur l'épandabilité des PRO. Des études sur l'épandage des effluents organiques nécessiteront des volumes importants d'échantillons, un lourd travail de manutention, des essais au banc et sur le terrain (dont le coût est important), et une approche statistique (exigeante en temps, main-d'œuvre et implication de la part des professionnels).

4. La calibration de la SPIR comme méthode de détermination rapide de la composition chimique et biochimique des effluents

4.1 Objectifs et méthode

Le sous-volet 2.3 visait à tester et valider la calibration de la Spectrométrie Proche Infra Rouge (SPIR), comme une méthode de détermination rapide de la composition chimique et biochimique des effluents ainsi que l'utilisation de la SPIR pour la prédiction directe *in situ* (au champ et au bâtiment). Ce sous-volet a été coordonné par l'INRA de Quimper et le LDAR pour la partie analyses de laboratoire. Leurs partenaires étaient l'INRA de Rennes, SAS Laboratoire, Arvalis-Institut du végétal, l'Institut de l'élevage, l'IFIP-Institut du porc, l'ITAVI, la Chambre régionale d'agriculture de Bretagne, et le Cirad-Réunion.

L'action 1 a porté sur la calibration de la méthode SPIR pour prédire les paramètres de composition des effluents d'élevage suivants : teneur en matière sèche (MS), en azote total (N), en azote ammoniacal, en phosphore et en potassium. L'objectif était d'établir des équations de prédiction des principaux paramètres de composition qui déterminent la valeur fertilisante des effluents, par la calibration de la mesure SPIR sur les valeurs de paramètres déterminés par les méthodes d'analyse chimique de référence. Une démarche distincte de calibration a été conduite pour chacune des trois catégories de produits les plus représentatifs du gisement national (fumier de bovins, lisier de porcs et fumier de volailles), en vue de pouvoir étendre ultérieurement la démarche à d'autres types de produits, dans le cadre d'autres projets. 200 échantillons ont été prélevés par catégorie de produit, sur lesquels les mesures SPIR, peu coûteuses, ont été effectuées. Les résultats de ces mesures ont été utilisés pour sélectionner les 150 échantillons les plus intéressants pour la calibration, qui, elle, requiert des analyses chimiques dont le coût est élevé. Pour une bonne calibration, les analyses chimiques de référence ont été faites en double.

L'action 2 a porté sur l'étude de la faisabilité de l'utilisation de matériels de mesure spectrale portables pour évaluer les teneurs des effluents *in situ*, en vue d'estimer la composition :

- du fumier de volailles en bâtiment d'élevage (prélèvements faits selon un plan d'échantillonnage soigneusement préétabli, immédiatement après le départ des animaux pour abattage dans des élevages de l'île de la Réunion, échantillons homogénéisés par brassage à la main) [Bastianelli et al., 2007],
- d'un fumier de bovins (20 échantillons prélevés sur une parcelle immédiatement après épandage, dans cinq exploitations agricoles de l'Ille et Vilaine).

Les modes opératoires relatifs à la préparation des échantillons et les méthodes d'analyse des différents laboratoires impliqués dans ces analyses et mesures spectrales (LDAR, SAS et CIRAD Réunion) ont été

harmonisés et une démarche d'intercomparaison des résultats analytiques et des mesures spectrales a été mise en place.

4.2 Résultats obtenus

4.2.1 Résultats de l'action 1

- Standardisation des spectres entre laboratoires et screening de l'effectif

Les spectres ayant été obtenus avec plusieurs appareils (deux XDS de Foss, deux Labspec d'ASD et un Nirflex de Büchi) et les réponses étant différentes selon les appareils, il a été nécessaire de standardiser les réponses spectrales des différents appareils pour pouvoir traiter les données sur la même base. Cette première étape de standardisation a permis de regrouper l'ensemble des mesures spectrales et de faire le travail de screening de l'effectif permettant d'établir la liste des échantillons sur lesquels les analyses de référence ont été faites.

- Paramétrage d'équations de prédiction (Thuriès *et al.*, 2013a)

La Figure 3 présente la comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par les équations issues du paramétrage de la mesure SPIR réalisée sur des échantillons frais (non séchés).

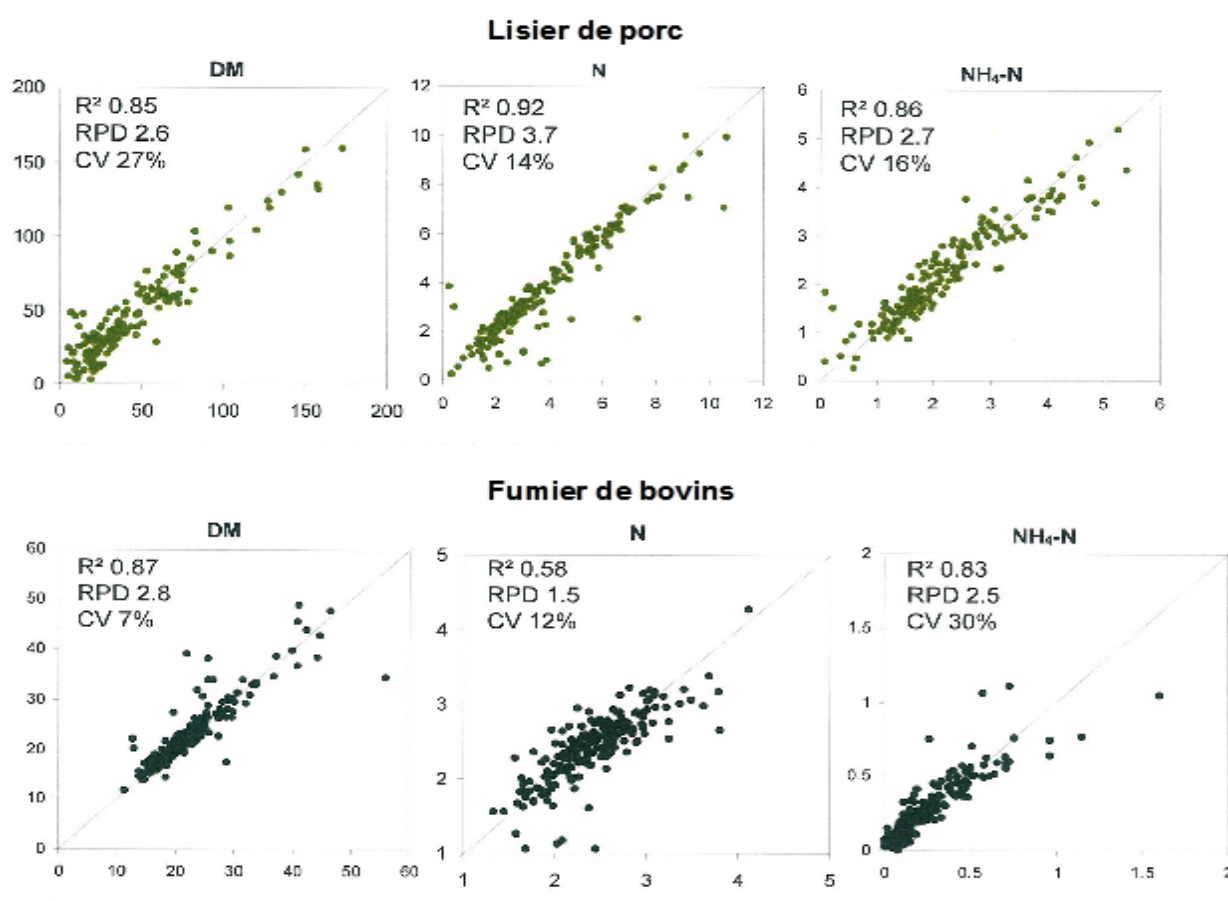


Figure 3 : Comparaison des valeurs prédites (en abscisse) et mesurées (en ordonnée) pour les 3 effluents et pour les 3 teneurs paramétrées (DM : teneur en MS [matière sèche], teneur en N et N-NH₄, en g L⁻¹ pour les lisiers de porc, et en g 100g⁻¹ MS pour les fumiers de bovins).

4.2.2 Résultats de l'action 2

- Mesures de litières de volailles en bâtiment

Les modèles élaborés à partir des mesures sur litières de volailles faites *in situ* en bâtiment d'élevage présentent de bonnes performances, comparativement aux mesures faites au laboratoire. Une voie d'amélioration serait d'étendre la base de données 'bâtiment', ce jeu de données étant inférieur de moitié au jeu de données obtenu au laboratoire.

- Mesures au champ de fumier de bovins

On peut constater que si l'allure générale de la réponse spectrale du fumier épandu sur un même site est la même, l'amplitude totale de la réflectance varie dans un rapport de 1 à 3 ; ce sont donc des paramètres de la forme du spectre qu'il faut considérer plutôt qu'une réflectance dans une longueur d'onde donnée.

La réflectance est le résultat d'une interaction rayonnement-matière qui dépend à la fois de la composition chimique (organique et minérale) de la matière et de ses propriétés physiques, en particulier l'état de surface de l'échantillon et sa teneur en eau. La variabilité observée est donc liée à la variation d'une partie ou de l'ensemble de ces paramètres, mais à ce stade il est difficile de dire dans quelle proportion chacun de ces facteurs influence la réponse spectrale d'un échantillon à l'autre.

On constate par ailleurs que l'allure générale du spectre moyen est la même pour chaque site, mais que l'amplitude totale est variable. Par ailleurs, la comparaison de cette amplitude totale pour les spectres moyens homogénéisés et non homogénéisés par site ne montre pas de différences significatives, alors qu'il n'en est pas de même lors de la comparaison intersites. Toutefois, il est préférable d'homogénéiser les échantillons du fait que la présence de la paille peut rendre difficile l'acquisition des spectres sur les échantillons non homogénéisés.

Les travaux réalisés sur 100 échantillons de fumier pailleux de bovins composté provenant de cinq sites différents montrent que des corrélations existent bien entre la réflectance spectrale et certains des paramètres considérés. Les prédictions des modèles calibrés à partir des mesures de terrain sont satisfaisantes à moyennement satisfaisantes. Les modèles avec les meilleures performances ont été obtenus sur des échantillons frais homogénéisés au laboratoire.

En conclusion et de manière qualitative, la différence de la réponse spectrale observée, au sein d'un même site ou entre deux sites différents, est donc nécessairement liée à une différence des caractéristiques physico-chimiques du fumier de bovin épandu. L'interprétation de ces spectres de réflectance reste toutefois complexe et la mise en relation, de manière quantitative, du spectre avec les paramètres utiles de l'échantillon (Ctot, Corg, Ntot, N-NH₄...) nécessite des méthodes statistiques relativement élaborées, du type calibration multivariée.

4.3 Conclusion et perspectives

Ce sous-volet a permis de montrer que le paramétrage d'équations prédictives des teneurs en MS, N et N-NH₄ à partir de mesures SPIR réalisées sur des échantillons non séchés et non finement broyés donne des résultats satisfaisants pour les trois effluents les plus importants du gisement national. Cela a été rendu possible par l'application de règles et de protocoles rigoureux aux étapes successivement suivies : choix de la taille minimale de l'effectif, échantillonnage, conservation, traitement des échantillons au laboratoire, standardisation des mesures spectrales...

On a ainsi pu montrer que les modèles de prédiction de la teneur en MS élaborés pour les trois effluents sont de performance égale aux méthodes analytiques de référence. Les modèles de prédiction des teneurs en N et NH₄ sont également très performants pour la litière de volaille. Ces mesures sur échantillons frais constituent donc une alternative sérieuse aux méthodes de référence coûteuses et requérant un délai assez long pour obtenir le résultat (Thuriès *et al.*, 2012 ; Thuriès *et al.*, 2013b).

Il n'a pas été possible sur la durée du programme de traiter les données relatives aux teneurs en P₂O₅ et K₂O des produits, ni les valeurs de référence pour la validation sur les teneurs en MS, N et NH₄. Les mesures chimiques de référence ayant été faites, il reste à conduire l'étape de paramétrage des équations de prédiction.

En définitive, les mesures SPIR réalisées directement en bâtiment d'élevage ou immédiatement après épandage donnent des résultats prometteurs et permettent d'envisager de prolonger ces travaux. Ce travail mérite donc d'être poursuivi pour affiner et valider les résultats déjà obtenus, notamment en (i) augmentant la taille de la population par l'intégration d'autres sites, (ii) menant une réflexion sur la

manière d'améliorer l'acquisition des spectres sur le terrain, et (iii) validant les modèles calibrés sur un jeu de données n'entrant pas dans la calibration des modèles (validation externe).

Par ailleurs, si l'objectif n'est pas d'aller vers des prédictions précises des teneurs en N et en C mais d'être capable de **déterminer à quelle classe de composé appartient un produit**, la méthode basée sur la SPIR semble très prometteuse. Il s'agit d'abord de définir ces classes de composés (par exemple par une analyse discriminante) et ensuite de voir avec quelle précision les modèles calibrés permettront de classer les produits testés. L'étude pourrait utilement être étendue à d'autres produits.

5. Acquisition de nouvelles références

Les travaux menés dans ce 3^{ème} volet ont consisté à procéder à l'inventaire et la sélection des produits issus de nouveaux procédés de traitement selon leur intérêt dans le cadre du projet. Une étude de leur épandabilité par les expérimentations et les analyses en laboratoire était initialement prévue, mais n'a pas été réalisée après le constat que les effluents travaillés ou transformés (p.ex. lisier de bovin tamisé) ne posaient plus guère de problème à l'épandage.

Ce volet a été coordonné par la Chambre régionale d'agriculture de Bretagne en partenariat avec l'Institut de l'élevage, l'ITAVI, l'IFIP et l'Irstea. Les laboratoires (essentiellement le LDAR), les divers instituts et les chambres d'agriculture du Loiret, de Vendée et de Lorraine ont été sollicités pour collecter des échantillons à analyser et harmoniser les protocoles.

Le choix des produits à étudier a été réalisé en fonction de la connaissance à acquérir sur des effluents qui présentaient des possibilités de développement à l'avenir, compte tenu des évolutions des bâtiments d'élevage et du développement de nouveaux procédés de traitement, et n'étaient pas déjà en cours de caractérisation dans le cadre d'autres projets. Les cinq « nouveaux produits » suivants ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une caractérisation dans le cadre de ce volet :

1. lisier de bovins issu de séparateur de phases,
2. compost de fèces de porcs issues du raclage en V,
3. compost de fumier pailleux de truies gestantes,
4. compost de fumiers de volailles traités avec un activateur de compostage,
5. digestats bruts de méthanisation.

Ce volet visait à caractériser les PRO issus de ces nouvelles techniques, tant d'un point de vue agronomique (caractérisation, épandabilité) qu'économique (coût de mise en œuvre), en vue de leur valorisation optimale en agriculture.

5.1 Lisier de bovins tamisé

L'accroissement de la taille des élevages bovins se traduit par une augmentation de la quantité des effluents produits, d'où des difficultés de gestion (capacités de stockage, coût du transport sur des zones éloignées...). Par ailleurs, certains effluents (fumiers mous, lisiers pailleux) peuvent être difficiles à épandre (obstruction des pendillards, des enfouisseurs...). C'est pourquoi le recours à un **séparateur de phases**, qui permet de fournir à l'éleveur deux produits (une phase solide pouvant être transportée et épandue aisément sur des zones non épandables en lisier, et une phase liquide de volume réduit, plus facilement épandable par des matériels de type pendillards), est apparu intéressant à étudier. Cette sous-action porte sur **les co-produits liquides et solides** issus de la séparation de phases mécanique des effluents d'élevages bovins.

L'Institut de l'élevage, en lien avec la CRAB, a suivi sept élevages de grande à très grande dimension (800 000 à 1 000 000 l de lait de quotas) dans l'Ouest de la France en 2011 et début 2012 (certains élevages ont fait l'objet de prélèvements à plusieurs dates). Ces élevages, selon le type de bâtiment, produisent des lisiers plus ou moins pailleux. Lorsqu'un système d'hydrocurage existe, le lisier est utilisé pour évacuer les déjections produites. Afin de faciliter la valorisation des effluents, ces élevages se sont équipés de séparateur de phases, soit à tamis vibrant, soit à vis presseuse.

Le suivi a porté sur la quantification des volumes de déjections transitant en un temps donné par le séparateur (effluents bruts avant séparation et phase solide séparée, la phase liquide étant obtenue par différence). Des échantillons ont été prélevés avant (lisier brut) et après séparation (phase liquide et phase solide fraîche + évoluée) en vue de leur analyse (pH, densité, matière sèche, matière organique, azote total, azote ammoniacal, phosphore et potassium). Le bilan des minéraux et le taux de capture ont alors été réalisés et ont permis de juger de l'efficacité de la séparation pour les deux types de matériel.

Il apparaît que les caractéristiques des issues de séparation varient selon celles du lisier brut initial, la technique utilisée et le réglage du matériel. Il sera nécessaire à l'avenir de poursuivre ces travaux sur un plus grand nombre d'élevages étant donné la variabilité observée. Les phases solides fraîches et évoluées sont agronomiquement proches d'un fumier de bovin et classables en type I de la Directive Nitrates. Les études de minéralisation de l'azote en laboratoire montrent que l'azote présent ne se minéralise que très lentement. Ces produits peuvent, dans certains cas, réorganiser de l'azote. Ils peuvent se stocker en tas, sont épandables par des épandeurs à fumier classiques et remplacent agronomiquement le fumier de bovin.

5.2 Compost de fèces de porcs issues du raclage en V

Le raclage en V est une nouvelle technique de séparation de phases urines/fèces en bâtiments porcins qui consiste à collecter les urines de façon continue dans une gouttière centrale au fond d'une fosse en forme de V, et à racler et pousser à l'extérieur de la porcherie les fèces, plusieurs fois par jour. Le faible temps de contact entre urines et fèces dans la porcherie permet de diminuer les émissions d'ammoniac au bâtiment de 50 %. Deux nouveaux produits sont obtenus : une fraction liquide et une fraction solide. Cette dernière représente 38 % de la masse des déjections et concentre 90 % du phosphore, 55 % de l'azote et 45 % du potassium. Ce procédé se développe rapidement, du fait de la réduction des émissions d'ammoniac et de la possibilité d'exporter la fraction solide, riche en phosphore et en azote, après transformation, hors plan d'épandage.

La CRAB a procédé à divers essais au sein de trois élevages afin d'identifier le(s) meilleur(s) *process* de compostage des fèces en vue de leur valorisation agronomique (mélange avec divers pourcentages de paille, utilisation de différents matériels de retournement, variation de la fréquence de retournement, ventilation forcée des tas en cours de compostage). Des prélèvements pour analyses agronomiques ont été effectués à diverses phases et des analyses de minéralisation de l'azote ont été réalisées sur le produit composté fini. Le suivi a porté sur des quantifications de flux de déjections en cours de transformation (réalisation de bilan de minéraux) et des analyses chimiques. Une fiche technique a été élaborée pour ce nouveau type de produit issu du compostage.

Après compostage et séchage, le produit présente une teneur en éléments fertilisants (N, P₂O₅ et K₂O) telle qu'il peut être classé en « engrais NP issus de lisier NFU 42 001 », à condition que la MS soit supérieure à 55 %. Il est classable en type I de la Directive Nitrates. Les études de minéralisation de l'N en laboratoire montrent que l'azote se minéralise très lentement. Ces produits réorganisent de l'azote dans un premier temps puis cette réorganisation se stabilise autour du point de départ. Ce compost peut se stocker en tas. Il est épandable par des épandeurs à fumier classiques mais vu les doses à apporter, des épandeurs spécifiques à disques ou de type chaux seront conseillés.

5.3 Compost de fumier pailleux de truies gestantes

Les truies gestantes pourraient être de plus en plus mises en groupe sur litière dans le cadre de la « réglementation bien-être »¹. Plusieurs raisons pourraient inciter les éleveurs à choisir la litière de paille comme mode de logement de leurs truies : prévenir les risques de problèmes d'aplombs chez les truies élevées en groupe, disposer d'un effluent solide pour l'épandage, et pouvoir éventuellement exporter ce fumier hors de l'exploitation en cas d'excédent sur le plan d'épandage.

¹ Directive européenne de 2001 renforçant les dispositions pour améliorer le bien-être des porcs, dont la mesure principale était l'obligation de loger les truies gestantes en groupe à partir du 1^{er} janvier 2013.

En l'absence d'un nombre suffisant d'éleveurs se positionnant dans une optique d'exportation du fumier, la CRAB a décidé de mener cinq cycles de compostage sur sa station de Crécom (22), où différents modes de logement des truies en groupe étaient en place depuis plusieurs années pour identifier le procédé le plus adapté pour valoriser ce fumier. Des prélèvements pour analyses agronomiques ont été effectués à diverses phases et des analyses de minéralisation de l'azote ont été réalisées sur le produit composté.

Ce PRO est relativement proche des références « fumier à base de paille composté » (IFIP 2005). Il s'en distingue par un taux de MO plus élevé, une teneur en N total un peu plus élevée et surtout par une teneur plus faible en P₂O₅, Cu et Zn. Les analyses microbiologiques montrent une absence de salmonelles et d'œufs d'helminthe et un nombre d'*E. Coli* et d'entérocoques décroissant avec le temps de compostage. Qu'il s'agisse de fumier frais, de fumier en cours de transformation ou de fumier en fin de transformation, la minéralisation de l'N organique est plutôt régulière, et en définitive peu importante (10 % de l'N organique au bout de 91 jours). L'N-NH₄ du PRO doit être pris en compte pour apprécier l'effet fertilisant (0,2 kg N/t).

5.4 Compost de fumier de volailles traité avec un activateur de compostage

Ce sous-volet visait à fournir une suite au projet Casdar n°9071 dit « Litières » pour l'acquisition de références sur la valeur agronomique des litières de pailles de céréale, compostées et traitées au préalable avec un activateur de compostage (Bactériolit®). Un seul éleveur s'est porté volontaire pour mettre en place des suivis, en juin 2012. Des premiers prélèvements d'échantillons ont été effectués (analyses agronomiques, de composition biochimique, incubation C et N, microorganismes pathogènes). Malheureusement, les difficultés de la filière du poulet export (Doux) ont mis fin à ces essais chez ce producteur dès l'automne 2012.

L'interprétation des quelques analyses a été faite. Elle est cohérente car tous les indicateurs vont dans le même sens. Le produit traité avec Bactériolit® semble être plus évolué que le produit sans cet activateur de compostage. Il correspond bien à la norme compost, sans amélioration significative par rapport à un compost standard. Cependant, au vu des premiers résultats, du fait de l'absence de répétitions, il est difficile de faire émerger une tendance mise à part une différence, à confirmer, dans les analyses de stabilité biochimique et d'incubation.

5.5 Digestats bruts de méthanisation

Le projet initial a été monté en 2009 dans un contexte dans lequel les digestats étaient très peu connus en France, le nombre de méthaniseurs installés était très faible et ni la composition, ni l'épandabilité des digestats n'étaient encore connues. Il prévoyait donc de sélectionner 8 digestats représentatifs des principales pratiques d'élevages et d'approcher leur valeur agronomique par caractérisation au laboratoire. Mais l'ADEME ayant lancé en 2010 une étude sur la caractérisation en laboratoire des digestats, cette approche n'était plus justifiée et cette sous-action a été réorientée vers une **caractérisation au champ** des digestats, sur divers sites identifiés en Bretagne (5 essais) et Loiret (4 essais) en vue de l'obtention d'un coefficient équivalence de l'azote au champ (ou Coefficient Apparent d'Utilisation : CAU).

Les résultats de ces essais au champ montrent en premier lieu une grande variabilité. La poursuite d'essais aux champs pour affiner les chiffres et comprendre les variations observées est indispensable. Les résultats permettent par ailleurs de formuler les observations suivantes :

- l'essai sur ray-grass d'Italie en 2010 en Bretagne met en exergue le risque d'effondrement du CAU avec des apports de surface en fin de printemps/été (pertes par dégagement de NH₃ ?) ;
- les essais du Loiret sur blé en 2011 et 2012 mettent en exergue que des apports à la palette (et à des doses supérieures aux besoins des cultures) impactent très négativement les CAU ;
- les essais bretons sur blé et ray-grass d'Italie où le digestat est apporté en fin d'hiver semblent montrer, en première approche, une certaine similitude avec les Keq du lisier de porc ;

- les essais bretons sur maïs en 2011 pointent des variations importantes entre l'injection et l'apport de surface (effet de dégagement de NH_3 ?) ;
- les essais Loiret sur colza en 2012 montrent un Keq élevé (86 %) pour l'apport de printemps.

5.6 Conclusion et perspectives

Le volet 3 « Nouveaux produits » a débouché sur l'acquisition de données de caractérisation chimique, biologique et de cinétique de minéralisation, ainsi que sur la rédaction de fiches, qui pourront servir à paramétrer ces nouveaux produits dans les OAD. Les premiers résultats acquis dans le cadre du projet et qui sont à confirmer montrent qu'il existe des similitudes entre le comportement d'un digestat et celui d'un lisier de porcs. Le travail de paramétrage dans les outils reste à faire sous réserve que les données de caractérisation des produits soient suffisantes. Il serait par ailleurs nécessaire de coupler ces résultats avec des essais au champ pour chacun des produits afin de valider les paramétrages.

Conclusion et perspectives : apports du projet pour une meilleure prise en compte des effluents d'élevage dans les OAD

Ce projet a abouti à :

- la mise en évidence des paramètres relatifs aux effluents d'élevage les plus déterminants sur les sorties des OAD actuels ;
- la mise au point d'un modèle de prédiction de la composition des effluents d'élevage sortie bâtiment et après stockage, utilisé pour l'élaboration du calculateur « Composim » ;
- la validation de l'application de la SPIR à la caractérisation au laboratoire et *in situ* des trois types d'effluents d'élevage les plus couramment utilisés pour l'épandage agricole en France ;
- la caractérisation chimique, agronomique et microbiologique de 3 nouveaux types de d'effluents d'élevage et des avancées sur 5 effluents ;
- un document de synthèse sur les outils de caractérisation physique des effluents d'élevage liquides, pâteux ou solides en vue d'évaluer leur épandabilité ;
- un descriptif de tous les types de machines et dispositifs d'épandage disponibles à ce jour.

Ce projet, qui visait initialement à intégrer les références acquises sur la composition et l'épandabilité des effluents dans les outils opérationnels de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des risques environnementaux, n'a pas pu atteindre cet objectif, par manque de temps. Le recul nécessaire à la synthèse des différents résultats n'a en effet pas été suffisant. L'INRA de Rennes et le LDAR, en partenariat avec l'ACTA, ARVALIS, Institut de l'élevage, IFIP, ITAVI et Irstea, ont néanmoins initié une réflexion autour de l'articulation des résultats des différents volets permettant d'améliorer la prise en compte des effluents dans les OAD (Figure 8). Des liens ont été établis entre les résultats de chacun des volets et ce que l'on peut envisager pour améliorer les outils.

En ce qui concerne le calculateur Composim, il peut être utilisé pour simuler les effets induits sur les sorties des OAD par les variations des différents facteurs considérés à l'échelle de l'exploitation agricole et à pas de temps annuel. Il permet de calculer les flux (masses et caractéristiques) de divers effluents, dont l'état d'humidité dépend du mode de logement des animaux, des usages de l'eau et du stockage des effluents.

En ce qui concerne la SPIR, elle a permis d'élaborer des modèles fiables de prédiction de la teneur en matière sèche pour le lisier de porcs et le fumier de bovins, et des teneurs en matière sèche, N et NH_4 pour le fumier de volailles. Ainsi, il convient maintenant d'évaluer, selon les éléments et les produits concernés, le degré d'amélioration induit par la précision des teneurs donnée par la SPIR, sur la précision des sorties des OAD.

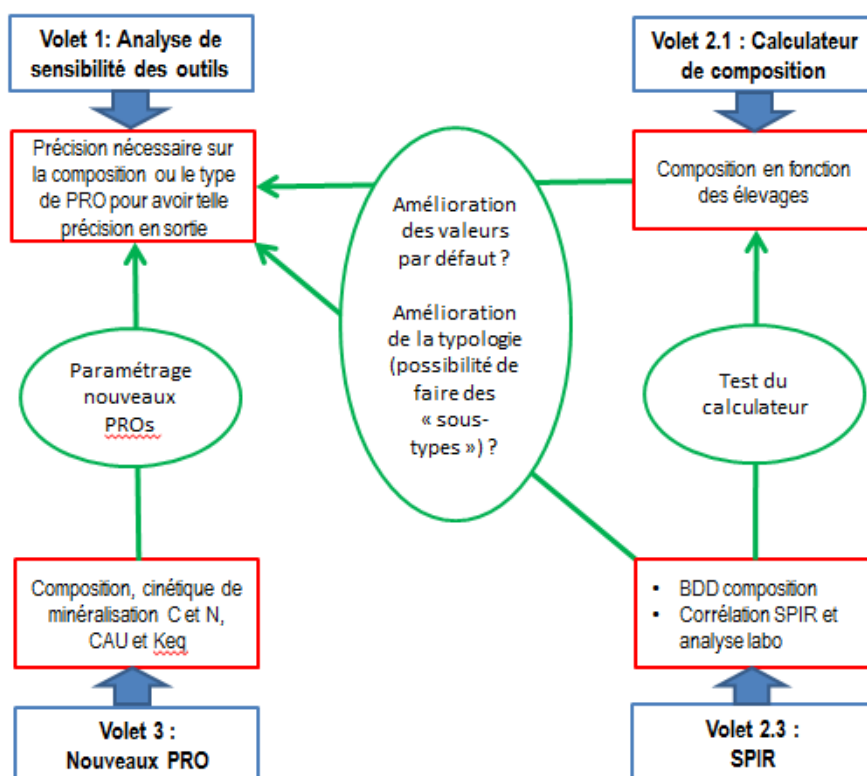


Figure 8 : Articulation entre les volets du projet.

En ce qui concerne les « nouveaux PRO », le projet a permis d’acquérir de nouvelles références en matière de caractérisation agronomique du lisier de bovin tamisé, du compost de fèces de porcs issues du raclage en V et du compost de fumier pailleux de truies gestantes. Ces nouvelles données de caractérisation chimique, biologique et de cinétique de minéralisation pourront permettre d’alimenter le paramétrage des OAD.

Ce projet a donc permis de dégager des pistes de poursuite des travaux visant *in fine* à élaborer une typologie des effluents d’élevage permettant de caractériser leur valeur agronomique et de prédire leur comportement à l’épandage, utilisable pour les outils de raisonnement de la fertilisation et d’évaluation des impacts environnementaux.

Références bibliographiques

- Bastianelli D., Lescoat P., Bouvarel I., Hervouet C., 2007. Analyse des composés azotés de fumiers de volailles de chair par spectrométrie dans le proche infra-rouge (SPIR) : application à l’étude de la variabilité intra- et inter-élevage. In: ITAVI (ed) Septièmes Journées de la Recherche Avicole. ITAVI, Tours, France, 59-63.
- Denoroy P., Dubrulle P., Schoeser M., Villette C., 2007b. Guide de paramétrage, version 3.2., INRA, Paris, 270 p.
- Denoroy P., Dubrulle P., Villette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M., Marin-Lafleche A., Pellerin F., Pellerin S., Boiffin J., 2004. RegiFert : interpréter les résultats des analyses de terre. INRA Editions, Paris, 128 p.
- Denoroy P., Villette C., Colomb B., Marin-Lafleche A., Mary B., Ganteil A., Dubrulle P., 2007a. RegiFert, Manuel de l’Agronome, version 3.2. INRA, Paris, 334 p.
- Dieudé-Fauvel E., Gauthier F., Havard P., Decoopman B., 2013. Description des outils de caractérisation physique des effluents d’élevage liquides, pâteux et solides. Rapport du volet 2.2 du projet CASDAR/ADEME « Améliorer la caractérisation des effluents d’élevage par des méthodes et des modèles innovants pour une meilleure prise en compte agronomique ».

Dubrulle P., Dupont A., Schoeser M., Villette C., Denoroy P., 2007. RegiFert, Manuel de l'Utilisateur, version 3.2. INRA, Paris, 304 p.

Machet J.-M., Dubrulle P., Damay N., Duval R., Recous S., Mary B., 2007. Azofert®: a new decision support tool for fertiliser N advice based on a dynamic version of the predictive balance sheet method. 16th International Symposium of the International Scientific Centre of Fertilizers, Gand (BEL), 16-19 sept. 2007.

Machet J.-M., Dubrulle P., Damay N., Philippon E., 2008. Plaquette de présentation de l'outil AzoFert®, 25 p.

Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P., Aubert C., Baillet A., Butler F., Beaudoin N., Béguin P., Cannavo P., Cohan J.-P., Dupont A., Duval R., Espagnol S., Flénet F., Fourrié L., Générmont S., Guichard L., Jeuffroy M.-H., Justes E., Laurent F., Machet J.-M., Maupas F., Morvan T., Pellerin S., Raison C., Raynal C., Recous S., Thiard J., 2011. Designing a DSS to reduce nitrogen losses in cropping systems. In "Nitro Europe Conference: Nitrogen & Global Change", Edinburgh, UK.

Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P., Cannavo P., Baillet A., Recous S., 2009. A dynamic model to develop the diagnosis of N losses at rotation scale, by the stakeholders. In "16th Nitrogen Workshop", Turin, Italy.

Reau R., Parnaudeau V., Dubrulle P., Aubert C., Baillet A., Butler F., Beaudoin N., Béguin P., Cannavo P., Cohan J.-P., Dupont A., Duval R., Espagnol S., Flénet F., Fourrié L., Générmont S., Guichard L., Jeuffroy M.-H., Justes E., Laurent F., Machet J.-M., Maupas F., Morvan T., Pellerin S., Raison C., Raynal C., Recous S., Thiard J., 2011. Diagnostic des pertes d'azote à l'échelle du système de culture avec Syst'N. In "10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse" (GEMAS-COMIFER, ed.), Reims, France.

Thouzeau A., Cosnier J.-Y., Dieudé-Fauvel E., Havard P., 2013. Les épandeurs d'effluents d'élevage : Description des machines et des dispositifs d'épandage. Rapport du volet 2.2 du projet CASDAR/ADEME « Améliorer la caractérisation des effluents d'élevage par des méthodes et des modèles innovants pour une meilleure prise en compte agronomique ».

Thuriès L., Aubert S., Aït Aïssa H., Bastianelli D., Bonnal L., Damay N., Dardenne P., Davrieux F., Ducept H., Fouad Y., Le Roux C., Morvan T., Moussard G., Mouteau A., Nabeneza S., Parnaudeau V., Trupin S., Valé M., 2012. Améliorer la prévision de la composition des principaux effluents d'élevage en France par l'utilisation de la SPIR : standardiser pour partager. In: Davrieux F. (Ed.), 13èmes Rencontres Héliospir "La métrologie de la spectroscopie PIR. Mieux mesurer les spectres". Héliospir, Montpellier (France).

Thuriès L., Aubert S., Bastianelli D., Bonnal L., Damay N., Davrieux F., Ducept H., Fouad Y., Le Roux C., Morvan T., Moussard G., Parnaudeau V., Trupin S., Valé M., Aït Aïssa H., Bazot A., Rottatinti T., Dardenne P., 2013a. The use of near infrared spectroscopy (NIRS) to better assess livestock effluents composition: a national experience. In: INRA (ed) 15th RAMIRAN international conference "Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services", Versailles, France.

Thuriès L., Morvan T., Fouad Y., 2013b. Accéder rapidement à la composition des lisiers de porc ? C'est possible. TechPorc 14, 13-15.