

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie



Année et N° du projet : AAP CASDAR 2009, projet n° **9109 / 9027**

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

## COMPTE RENDU FINAL DU PROJET

Période concernée : du 01/01/2010 au 30 juin 2013

Organisme chef de file : ACTA – le réseau des instituts des filières animales et végétales

Nom et organisme du chef de projet :

Jan. 2010 – août 2011 : Fabienne Butler (ACTA)  
Sept. 2011 – avril 2013 : Emmanuel de Chezelles (ACTA)  
Avril – juin 2013 : Mathilde Heurtaux (ACTA)





## A - Note synthétique :

- **Rappel du contexte du projet : des effluents d'élevage largement recyclés en agriculture, mais mal caractérisés du point de vue de leur valeur agronomique**

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, épandabilité) 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.

- **Rappel des enjeux**

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 RMT<sup>1</sup> « Fertilisation et Environnement » pour le raisonnement de la fertilisation (AzoFert®, Régifert®) et/ou l'évaluation des impacts environnementaux (Syst'N®) 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 des 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 préciser davantage 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®, modèle MELODIE), et ceux des partenaires du projet (MOLDAVI, Azolis, Planilis, MesP@rcelles) ;

<sup>1</sup> Réseau Mixte Technologique

- 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).

- **Le public cible, la zone concernée**

**16 partenaires** d'une large moitié de la France et de l'Île de La Réunion 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), l'Irstea (ex-Cemagref), le Cirad de l'Île de la Réunion, le LDAR<sup>2</sup>, SAS Laboratoire et les chambres d'Agriculture de Bretagne, du Loiret, de Vendée et de Lorraine. Leur programme de travail était organisé selon 4 volets complémentaires :

**Volet 1 :** Détermination des critères pertinents pour mieux décrire les effluents d'élevage dans les 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.

Le public visé par les résultats du projet est constitué en premier lieu des chercheurs, ingénieurs, techniciens, enseignants et agents de conseil et transfert des institutions de recherche, de développement et d'enseignement agricole, mais aussi des concepteurs, fournisseurs de données et utilisateurs de logiciels et d'outils d'aide à la décision (chambres d'agriculture, coopératives, négoce, laboratoires), et *in fine*, aux agriculteurs et éleveurs.

- **Synthèse des résultats obtenus**

Ce projet a abouti à :

- L'analyse de sensibilité de 4 outils de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des risques environnementaux (AzoFert®, RégiFert® et Syst'N® du RMT Fertilisation & Environnement, et Planilis® d'Arvalis)
- 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 » qui calcule mensuellement les flux de N-P-K ingéré, fixé (lait et viande) et excrété, en lien avec les flux de matière de litière et en fonction du mode de logement des animaux, des usages de l'eau et du stockage des effluents ;
- la validation de l'application de la SPIR à la caractérisation (teneurs en matière sèche, N et NH<sub>4</sub>) au laboratoire et *in situ* des trois types d'effluents d'élevage les plus couramment utilisés pour l'épandage agricole en France (fumier de bovins, lisier de porcs et surtout fumier de volailles) ;
- la caractérisation chimique, agronomique et microbiologique de trois nouveaux types de d'effluents d'élevage (PRO issus de la séparation de phase du lisier de bovin par tamisage ; du compostage de fèces de porcs issus de raclage en V ; et du compostage de fumier pailleux de truies gestantes) ;
- 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 et de recul. Une réflexion a néanmoins été initiée autour de l'articulation des résultats des différents volets permettant d'améliorer la prise en compte des effluents dans les OAD. Des liens ont été établis entre les résultats de chacun des volets et ce que l'on peut envisager pour améliorer les outils.

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.

---

<sup>2</sup> Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche de l'Aisne

## B – Compte rendu technique détaillé

<b>I – LES MODALITES D’ORGANISATION .....</b>	<b>5</b>
I-1. CONVENTIONS AVEC LES PARTENAIRES RECEVANT DES FINANCEMENTS DU CASDAR .....	5
I-2. MODALITES DE PILOTAGE .....	5
I-3. CALENDRIER .....	6
I-4. TABLEAU DE BORD DE SUIVI DES MOYENS MIS EN ŒUVRE .....	7
I-5. LES MODALITES D’EVALUATION .....	8
<b>II - LES PARTENARIATS : .....</b>	<b>9</b>
II-1. LE ROLE ET L’APPORT DE CHAQUE PARTENAIRE .....	9
II-2. BILAN DU FONCTIONNEMENT DES PARTENARIATS .....	11
<b>III – LE DEROULEMENT DU PROJET, ACTION PAR ACTION.....</b>	<b>12</b>
III.1. VOLET 1.....	12
o <i>rappel des objectifs attendus</i> .....	12
o <i>méthodes de travail utilisées</i> .....	12
o <i>organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés</i> .....	13
Démarche et résultats pour l’outil AzoFert <sup>®</sup> .....	14
Démarche et résultats pour l’outil Syst’N <sup>®</sup> .....	20
Démarche et résultats pour l’outil Planilis <sup>®</sup> .....	27
Démarche et résultats pour l’outil RégiFert <sup>®</sup> .....	30
Discussion et conclusion générale .....	33
o <i>indicateurs de suivi</i> .....	34
III.2. VOLET 2.1.....	35
o <i>rappel des objectifs attendus</i> .....	35
o <i>méthodes de travail utilisées</i> .....	35
o <i>organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés</i> .....	36
o <i>étapes et calendrier</i> .....	37
o <i>résultats obtenus</i> .....	38
o <i>indicateurs de suivi</i> .....	41
o <i>indicateurs de réalisation</i> .....	41
III.3. VOLET 2.2.....	42
o <i>rappel des objectifs attendus</i> .....	42
o <i>méthodes de travail utilisées</i> .....	42
o <i>organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés</i> .....	43
o <i>étapes et calendrier</i> .....	43
o <i>résultats obtenus</i> .....	43
o <i>indicateurs de suivi</i> .....	46
o <i>indicateurs de réalisation</i> .....	46
III.4. VOLET 2.3.....	47
o <i>rappel des objectifs attendus</i> .....	47
o <i>méthodes de travail utilisées</i> .....	47
o <i>organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés</i> .....	49
o <i>étapes et calendrier</i> .....	52
o <i>résultats obtenus</i> .....	54
o <i>indicateurs de suivi</i> .....	60
o <i>indicateurs de réalisation</i> .....	61
III.5. VOLET 3.....	62
o <i>rappel des objectifs attendus</i> .....	62
o <i>méthodes de travail utilisées</i> .....	62
o <i>organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés</i> .....	62
o <i>étapes et calendrier</i> .....	62
o <i>résultats obtenus</i> .....	63
Lisier de bovin tamisé .....	63
Compost de fèces de porc issus du raclage en V .....	64
Compost de fumier pailleux de truies gestantes .....	66

Fumier de volaille composté avec un activateur .....	67
Digestats bruts de méthanisation .....	69
○ <i>indicateurs de suivi</i> .....	72
○ <i>indicateurs de réalisation</i> .....	73
<b>IV - VOLET 4 : VALORISATION ET TRANSFERT .....</b>	<b>75</b>
○ <i>rappel des objectifs attendus</i> .....	75
○ <i>méthodes de travail utilisées</i> .....	75
○ <i>étapes et calendrier</i> .....	76
○ <i>organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés</i> .....	76
Sous-volet 4.1 : modalités de valorisation du projet dans les OAD .....	76
Sous-volet 4.2 : modalités de diffusion et transfert des résultats .....	79
○ <i>exploitation et valorisation des résultats, de l'expérience acquise</i> .....	82
○ <i>les transferts prévus</i> .....	82
<b>V – LES PERSPECTIVES .....</b>	<b>84</b>
○ <i>les points forts et les points faibles du projet</i> .....	84
○ <i>les difficultés rencontrées</i> .....	85
○ <i>les suites envisagées</i> .....	86
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>88</b>

# I – Les modalités d’organisation

## I-1. Conventions avec les partenaires recevant des financements du CASDAR

Après avoir signé la convention de financement avec le ministère chargé de l’agriculture (DGER) le 8 décembre 2009, l’ACTA a signé 12 conventions bipartites de redistribution des fonds CASDAR au cours du premier semestre 2010, avec les partenaires suivants : Arvalis-institut du végétal, Institut de l’élevage (idele), IFIP, ITAVI, INRA, Irstea (ex-Cemagref), Cirad-Réunion, LDAR, Chambres régionales d’agriculture de Bretagne et de Lorraine, Chambres d’agriculture du Loiret et de Vendée.

- CA Loiret : 8 février 2010
- IFIP : 9 février 2010
- Institut de l’élevage : 17 février 2010
- CRA Bretagne : 18 février 2010
- Irstea (ex-Cemagref) : 25 février 2010
- CIRAD : 15 mars 2010
- LDAR : 15 mars 2010
- CRA Lorraine : 24 mars 2010
- ITAVI : 30 mars 2010
- Arvalis : 9 avril 2010
- INRA : 21 juin 2010
- CA Vendée : 23 juin 2010

L’ACTA a par ailleurs co-signé le 25 janvier 2011 une convention multilatérale de cofinancement complémentaire avec l’ADEME et le LDAR, le Cirad-Réunion et SAS-Laboratoire.

## I-2. Modalités de pilotage

### a) comités de pilotage : dates, participants, teneur des discussions

Le comité de pilotage, dont la composition a légèrement évolué au cours du projet, était constitué d’un représentant par organisme partenaire technique et par partenaire financier (MAAF/DGER et ADEME).

- DGER : Isabelle POULET, Danièle SAINT LOUBOUÉ
- ADEME : Fabienne MULLER
- ACTA : Fabienne BUTLER, Alain MOUCHART, Emmanuel DE CHEZELLES
- Arvalis : Robert TROCHARD
- idele : Jean-Baptiste DOLLE, Alicia CHARPIOT, Elise LORINQUER
- IFIP : Pascal LEVASSEUR
- ITAVI : Claude AUBERT
- INRA Rennes : Virginie PARNAUDEAU
- INRA Quimper : Thierry MORVAN
- INRA Laon : Jean-Marie MACHET
- INRA Bordeaux : Pascal DENOROY
- Cirad La Réunion : Laurent THURIES
- Irstea (ex-Cemagref) : Emilie DIEUDE-FAUVEL
- LDAR : Nathalie DAMAY
- SAS Laboratoire : Matthieu VALE
- CRA Bretagne : Bertrand LEBRIS, Bertrand DECOOPMAN
- CRA Lorraine : Aurore RAVENEAU
- CA 45 : Laurent LEJARS
- CA 85 : David DU CLARY, Jean-François MOREAU

Il était animé par l’ACTA et avait pour rôle de valider les résultats obtenus durant l’année écoulée, présentés par les partenaires du projet, et le programme de travail de l’année à venir.

Le comité de pilotage s'est réuni 4 fois, à fréquence annuelle :

1. Réunion de lancement du 14/01/2010 (22 participants) :
  - Présentation du projet et du cadre administratif et financier
  - Informations techniques et méthodologiques (le paramétrage des outils, la SPIR, les digestats de méthanisation agricole)
  - Programmation des actions et organisations à mettre en place pour chacun des volets (travaux de groupe, restitution des travaux de groupe, discussion)
2. Réunion du 13/01/2011 (23 participants) :
  - Retour sur le schéma "Finalité-Actions" du projet et rappel du calendrier prévisionnel de réalisation
  - État d'avancement des travaux par volet. Bilan de la première année de réalisation du projet
  - Point administratif et financier
  - Séance en groupes : organisation et préparation des travaux 2011 et 2012, par volet et sous-volet
3. Réunion du 10/01/2012 (17 participants) :
  - État d'avancement des travaux par volet
  - Point administratif et financier
  - Propositions et discussions sur le volet 4
  - Séance en groupes : organisation et préparation des travaux 2012 et discussion par volet et sous-volet
4. Réunion du 04/02/2013 (11 participants) :
  - Point administratif et financier, approbation de réaffectations budgétaires
  - État d'avancement des travaux par volet
  - Point concernant les rendus du projet

#### **b) autres modalités de pilotage (groupe de travail, comité technique...)**

Les tâches à mener à bien ont été réparties entre plusieurs groupes de travail chargés de la mise en œuvre de chaque volet et sous-volet, composés comme suit (les coordonnateurs sont soulignés) :

- **Volet 1** (définition des besoins des outils en termes de caractérisation des effluents d'élevage) : LDAR, INRA de Rennes, INRA de Laon, INRA de Bordeaux, Arvalis, idele, IFIP, ITAVI
- **Sous-volet 2.1** (élaboration d'un modèle de simulation et mise au point d'un calculateur de la composition des effluents d'élevage) : IFIP, idele, ITAVI
- **Sous-volet 2.2** (analyse de l'épandabilité des effluents d'élevage) : Irstea, CRAB
- **Sous-volet 2.3** (prédiction de la composition des effluents d'élevage par la SPIR) : INRA de Quimper, LDAR, INRA de Rennes, Cirad-Réunion, ACTA, SAS, Arvalis, idele, IFIP, ITAVI, CRAB, chambres d'Agriculture du Loiret, de la Vendée et de Lorraine
- **Volet 3** (acquisition de références sur de « nouveaux effluents ») : CRAB, Irstea, idele, ITAVI, IFIP, LDAR, chambres d'Agriculture du Loiret, de la Vendée et de Lorraine
- **Sous-volet 4.1** (amélioration de la prise en compte des effluents dans les outils) : LDAR, INRA de Rennes/Quimper, Laon et Bordeaux, Arvalis, idele, ITAVI, IFIP, CRAB
- **Sous-volet 4.2** (transfert) : ACTA, CRAB, INRA de Rennes, idele, IFIP, ITAVI, Irstea, CA 45, CA 85, CRA Lorraine

Les groupes de travail se sont retrouvés régulièrement au cours du projet lors de réunions physiques ou téléphoniques, et/ou de visioconférences pour mettre en œuvre le programme de travail du (ou des) volet(s) concerné(s).

### **I-3. Calendrier**

La mise en œuvre du projet ayant accusé du retard sur les différents volets, une prolongation de 6 mois a été accordée par la DGER par avenant du 11/12/2012 à la convention de financement CASDAR, reportant la date de

fin d'exécution des travaux au 30 juin 2013. Le tableau 1 présente le planning de réalisation des tâches au cours des 3 années et demie du projet.

Volet	2010				2011				2012				2013		2014
1	X	X	X	X	X	X	X	X							
2.1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
2.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
2.3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
3		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
4.1													X	X	
4.2							X			X			X	X	X

Tableau 1 : Planning de réalisation du projet.

#### I-4. Tableau de bord de suivi des moyens mis en œuvre

Le tableau 2 présente le bilan du temps indicatif consacré par chaque partenaire à la mise en oeuvre du projet. Les détails par volet figurent dans la section III « déroulement du projet ».

Organisme	Agent (catégorie)	Temps affecté (en mois)	Total
ACTA	F Butler (ingénieur)	1,85	7,61
	E de Chezelles (ingénieur)	3,66	
	M Heurtaux (ingénieur)	1,09	
	M Sellam (ingénieur)	0,34	
	P Vissac (Dir. scientifique & technique)	0,69	
ARVALIS	S Aubert (ingénieur)	0,23	4,00
	A Bouthier (ingénieur)	0,34	
	D Contesse (technicien CDD)	0,09	
	C Le Souder (ingénieur)	0,25	
	A Laroche (technicien)	0,20	
	B Moulinier (technicien)	0,28	
	R Trochard (ingénieur)	2,05	
	S Trupin (ingénieur)	0,56	
CRA Bretagne	B. Decoopman (ingénieur)	4,08	11,80
	A. Loussouarn (ingénieur)	3,71	
	E. Dezat (ingénieur)	2,97	
	B. Le Bris (ingénieur)	0,21	
	P. Havard (ingénieur)	0,29	
	F. Gauthier (ingénieur)	0,48	
	D. Haddedj (ingénieur)	0,03	
	P. Quideau (ingénieur)	0,03	
CA Loiret	L. Lejars (ingénieur)	1,08	1,68
	J-M. Huberson (technicien)	0,47	
	M. Ouy (ingénieur)	0,13	
CRA Lorraine	A. Raveneau (ingénieur)	2,04	2,04
CA Vendée	D. du Clary (conseiller spécialisé)	0,34	0,55
	J-F. Moreau (conseiller spécialisé)	0,21	
Cirad Réunion	L. Thuriès (chercheur)	8,07	24,09
	G. Moussard (technicien)	4,02	
	A. Bazot (stagiaire)	7,00	
	N. Essouf Kamby (stag.)	2,00	
	H. Aitaissa (stagiaire)	3,00	
Idele	A Charpiot (ingénieur)	5,19	8,55
	J-L Ménard (ingénieur)	1,39	
	E Lorinquer (ingénieur)	0,89	
	J-B Dollé (ingénieur)	0,73	
	M Ferrand (ingénieur)	0,35	
IFIP	P Levasseur (ingénieur)	7,45	7,45

Organisme	Agent (catégorie)	Temps affecté (en mois)	Total
INRA	V Parnaudeau (IE1)	7,50	23,83
	T Morvan (IE1)	4,90	
	Y Fouad (MC-CR2)	1,50	
	P Denoroy (IR1)	3,93	
	J-M Machet (ingénieur)	4,00	
	S Martin (CDD technicien)	2,00	
IRSTEA	E Dieudé-Fauvel (ingénieur)	2,96	7,28
	Y Pocrain (stagiaire)	3,60	
	A Thouzeau (ingénieur CDD)	1,58	
	F Chabot (ingénieur)	0,12	
	M Rousselet (ingénieur)	0,09	
	J Mazoyer (ingénieur)	0,06	
	J-C Mégrien (technicien)	0,54	
	G Brenon (technicien)	0,18	
	J-F Devaux (technicien)	0,15	
ITAVI	C Aubert (Bac + 5)	3,08	4,96
	P Ponchant (Bac + 5)	0,86	
	J Champagne (Bac + 5)	1,02	
LDAR	N Damay (ingénieur)	4,67	19,72
	C Le Roux (ingénieur)	3,47	
	H Ducept (ingénieur)	1,19	
	J Gogibus (technicien)	9,06	
	J Gaillard (ingénieur)	1,33	
SAS Laboratoire	M Valé	0,5	0,5
<b>TOTAL</b>			<b>124,06</b>

Tableau 2 : Moyens humains mis en œuvre.

### I-5. Les modalités d'évaluation

L'évaluation de l'avancement des travaux a été assurée par le comité de pilotage du projet lors de chacune de ses réunions annuelles, qui lui a permis de contrôler l'atteinte des objectifs attendus.

## II - Les partenariats :

### II-1. Le rôle et l'apport de chaque partenaire

#### - ACTA

- Gestion administrative, financière et technique du projet
- Animation du comité de pilotage du projet
- Coordination de la rédaction des rapports techniques et financiers annuels, du rapport final
- Participation à la rédaction des comptes-rendus de réunions
- Coordination et mise en œuvre des travaux de la deuxième phase du volet 4 avec la CRAB et la CA 45 : transfert des connaissances acquises vers les professionnels
- Participation aux travaux des volets 1 et 4 relatifs à l'amélioration des outils, en lien avec les projets CASDAR « Gestion durable des sols » et « Volat'NH3 »
- Communication sur le projet au sein du RMT « Fertilisation & Environnement » et envers le RMT « Elevages & environnement »
- Valorisation scientifique et technique du projet

#### - Arvalis

- Pour le volet 1, apport d'expertise et d'outils de calcul de la fertilisation (Azolis et Planilis) réalisation de l'analyse de sensibilité des sorties de ces outils à des variations de composition des effluents d'élevages et participation à la rédaction du cahier des charges
- Pour le volet 2.3, réalisation d'analyses spectrales de produits issus d'élevages et développement des calibrations de la SPIR (teneurs en MS, C, N-NH<sub>4</sub>, Ntotal, P et K)
- Pour le volet 4.1, participation à la prise en compte des contraintes liées à la valorisation agronomique des effluents d'élevage dans les outils

#### - idele

- Pour le volet 1, participation à l'élaboration du protocole de prélèvement des échantillons de fumiers et lisiers en fermes et proposition d'une typologie des élevages bovins servant de « clef d'entrée » de la Base de Données constituée dans ce projet à partir de 200 produits (fumiers) différents
- Co-coordination du volet 2.1 avec l'IFIP, et construction de la partie « bovin » du calculateur
- Participation aux travaux du volet 2.3 par l'élaboration du questionnaire posé lors de la récupération d'échantillons en exploitation
- Contribution à la mise en œuvre du volet 3 sur les nouveaux produits

#### - IFIP

- Co-coordination du volet 2.1 avec l'idele et mise en œuvre des travaux par la construction du calculateur de composition des effluents d'élevage, la rédaction d'un guide méthodologique et d'une notice d'emploi
- Pour le volet 1, contribution à la détermination des critères pertinents pour mieux décrire les effluents d'élevage dans les outils
- Participation aux travaux du volet 2.3 par une expertise sur le protocole de collecte des échantillons et la fourniture d'échantillons de lisier de porc pour la calibration de la SPIR
- Contribution à la mise en œuvre du volet 3 sur les nouveaux produits

#### - ITAVI

- Pour le volet 2.1, participation aux travaux de modélisation de la composition des effluents d'élevages de volailles et contribution à la rédaction du cahier des charges du calculateur, du guide méthodologique et de la notice d'emploi
- Participation à l'atelier de travail sur l'épandabilité des effluents (volet 2.2)
- Participation aux travaux du volet 2.3 par une contribution à la rédaction du protocole de prélèvement des échantillons et la collecte d'échantillons de fumiers de volailles pour des analyses chimiques en vue de la calibration de la méthode par la SPIR
- Contribution à la mise en œuvre du volet 3 sur l'étude de la composition et de l'épandabilité des nouveaux produits

#### **- INRA (SAS Rennes/Quimper, AgrolImpact Laon, TCEM Bordeaux)**

- Co-coordination des volets 1, 2.3 et 4.1
- Apport d'expertise dans le volet 1 et mise en œuvre des travaux : étude de sensibilité des outils RégiFert®, AzoFert® et Syst'N® portés par le RMT F&E
- Apport d'expertise dans le volet 2.3 et mise en œuvre des travaux : campagne d'échantillonnage, mesures SPIR, screening, analyse des données, calibration de la SPIR et paramétrage d'équations de prédiction
- Co-encadrement de stagiaires ingénieurs sur le volet 2.3
- Pour le volet 4.1, rédaction d'un document de synthèse
- Valorisation scientifique et technique du projet

#### **- Cirad Réunion**

- Apport d'expertise dans le volet 2.3 et mise en œuvre des travaux :
  - campagne d'échantillonnage (collecte de 17 fumiers de bovin, 137 litières de volaille, et 36 lisiers de porc) ;
  - mesures SPIR sur échantillons bruts (lisiers de porc) et sur échantillons bruts et séchés (fumiers de volaille et de bovins) ;
  - standardisation des spectromètres utilisés dans les 3 laboratoires partenaires (CIRAD, SAS-Arvalis et LDAR) pour harmoniser les mesures spectrales ;
  - screening des 3 effectifs de produits sur la base de la réponse spectrale et choix des produits sur lesquels les analyses chimiques de référence ont été réalisées ;
  - analyses chimiques et spectrales ;
  - analyse des données, calibration de la SPIR et paramétrage d'équations de prédiction ;
- Gestion opérationnelle d'un stage ingénieur de 6 mois, d'un stage DUT de 4 mois et d'un CDD de 6 mois pour le volet 2.3
- Valorisation scientifique et technique du projet

#### **- Irstea (ex-Cemagref)**

- Apport d'expertise dans les volets 1, 2.2, 3 et 4 du projet
- Co-coordination et mise en œuvre des travaux des volets 2.2 et 3 avec la CRAB : prédiction de l'épandabilité des effluents d'élevage et étude de l'épandabilité de nouveaux produits
- Valorisation scientifique et technique du projet

#### **- LDAR**

- Co-coordination des volets 1, 2.3 et 4.1
- Pour le volet 1, analyse de sensibilité des OAD portés par le RMT pour la détermination du niveau d'information et de précision requis par les outils RégiFert®, AzoFert® et Syst'N®
- Pour le volet 2.3, organisation et planification de la campagne de prélèvement et de collecte des échantillons, préparation des échantillons pour analyse ; mesures SPIR sur échantillons bruts (lisiers de porc) et sur échantillons bruts et séchés (fumiers de volaille et de bovins) ; analyses chimiques et spectrales ; analyse des données, premier travail de paramétrage d'équations de prédiction et communication ; gestion opérationnelle d'un CDD de 8 mois
- Collecte d'échantillons, analyses chimiques et harmonisation des protocoles pour le volet 3
- Valorisation scientifique et technique du projet

#### **- SAS Laboratoire**

- Apport d'expertises
- Prestations d'analyses chimiques et spectrales pour le volet 2.3

#### **- CRA Bretagne**

- Apport d'expertises dans les volets 1, 2, 3 et 4
- Co-coordination des volets 2.2 et 3 avec l'Irstea
- Acquisition de références sur des nouveaux produits, analyse d'essais
- Collecte des échantillons pour le volet 2.3
- Valorisation scientifique, pédagogique et technique du projet

### - CRA Lorraine, CA Loiret et CA Vendée

- Collecte d'échantillons pour la SPIR (volet 2.3)
- Apport d'expertises dans le volet 3, participation aux travaux d'acquisition de références sur des nouveaux produits (digestats de méthanisation agricole) par la mise en place d'essais

## II-2. Bilan du fonctionnement des partenariats

Globalement, les partenariats ont très bien fonctionné au sein de chaque volet, les coordinateurs de volet et leurs partenaires jouant leur rôle avec efficacité.

Ce projet a conforté des relations de travail existant préalablement entre certains partenaires, soit de façon bilatérale, soit dans le cadre de projets, notamment financés par le CASDAR et/ou l'ADEME (gestion durable des sols avec des produits organiques, Réseau PRO, Volat'NH3...) et/ou de groupes de travail spécifiques d'autres dispositifs ou structures (RMT Fertilisation & Environnement, RMT Elevages & Environnement, COMIFER...).

Par exemple, les Instituts Techniques animaux (porc, bovin et volaille) ont souvent élaboré et mené des projets en commun, compte tenu de la similitude des problématiques entre filières animales. Ainsi dans le volet 2.1 de ce projet, leur forte concertation initiale leur a permis de partager pleinement les enjeux et les connaissances, et de concevoir de façon consensuelle les parties communes du calculateur. La réalisation d'un outil commun aux trois productions animales porc/bovin/volaille a cependant constitué une difficulté car les méthodes de détermination des rejets sont très différentes, notamment entre monogastriques et ruminants. Ainsi, de multiples réunions, échanges téléphoniques et mails entre partenaires ont été nécessaires pour esquisser progressivement les premières maquettes de l'outil. La décision finalement retenue a été d'élaborer une page commune pour la présentation du troupeau et les résultats, les autres éléments (spécifiques à chaque filière animale) faisant l'objet d'onglets de saisie et de résultats distincts. Pour des raisons d'harmonisation, les instituts (IFIP, idele et ITAVI) ont travaillé sur une seule version du calculateur en se répartissant le temps de travail sur cet outil.

De même pour le sous volet 2.3, la forte implication des Instituts Techniques et des Chambres d'Agriculture dans le choix des exploitations et la collecte des échantillons d'effluents, a joué un rôle décisif dans la réussite de cette action, même si celle-ci a pris du retard du fait de la complexité de l'organisation et de la lourdeur du travail.

On a pu en revanche constater une certaine indépendance de travail entre les équipes-volets, les interactions entre elles étant pratiquement limitées aux réunions plénières annuelles de l'équipe-projet. Par exemple, les travaux menés par l'Irstea et la CRAB sur l'épandabilité des effluents n'avaient pas de liens scientifiques directs avec les travaux menés par les autres partenaires du projet (puisque à ce stade, il n'y a pas d'intégration possible de la notion d'épandabilité dans les modèles de composition ou de minéralisation), donc les interactions étaient faibles. Ceci a été accentué par l'absence de besoin concernant les expertises initialement prévues.

En définitive, l'organisation du projet en 6 groupes de travail correspondant aux 4 volets (et 3 sous-volets dans le volet 2) a permis une bonne dynamique de travail dans chacun des volets ainsi qu'une grande liberté d'organisation pour chacun d'eux. Ce travail en groupes distincts n'a pas permis à tous les partenaires de prendre conscience de l'incidence des retards sur le résultat final du projet. En outre, les changements successifs de chef projet n'ont pas joué en faveur du respect des délais et de la cohésion des divers groupes de travail.

Il est à noter qu'un groupe de travail du RMT Fertilisation & Environnement s'est constitué, à la faveur de ce projet, sur le "passage au champ" des références acquises au laboratoire sur les PRO, et a donné lieu au montage d'un projet en 2013, financé par l'ADEME.

## III – Le déroulement du projet, action par action

Cette partie est présentée volet par volet (cf. I.2-b, p. 6).

### III.1. Volet 1

#### ○ **rappel des objectifs attendus**

Ce volet visait à déterminer les critères pertinents pour mieux décrire les effluents d'élevage dans les outils de raisonnement de la fertilisation ou d'évaluation d'impacts environnementaux. Plus spécifiquement, l'objectif de ce volet était la détermination du niveau d'information et de précision requis par les outils portés par le RMT Fertilisation & Environnement (AzoFert®, Syst'N® et RégiFert®) et ses partenaires (Planilis®) pour obtenir des résultats acceptables dans le cadre de leur usage.

#### ○ **méthodes de travail utilisées**

L'**analyse de sensibilité** a été la méthode utilisée pour préciser l'impact de certaines caractéristiques des effluents et des modalités d'épandage dans les outils, et pour hiérarchiser le poids des différentes données (ex. quantité apportée, teneur en N total...).

**Quatre outils** ont été concernés par cette analyse de sensibilité. Des fiches de description de chacun des outils ont été réalisées au cours du projet (cf. annexe 1-Fiches description outils) :

- 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 ; logiciel de calcul des pertes gazeuses et en solution de l'azote, 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".
- 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.

L'outil Azolis® d'Arvalis a également fait l'objet d'une fiche détaillée de description mais il est apparu que la version informatique de cet outil sur Internet ne permettait pas de procéder à une analyse de sensibilité.

**5 produits largement répandus et connus** 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 les paramètres suivants :

- variables d'entrée relatives aux effluents (teneurs en éléments, MS...) et aux épandages (doses, dates),
- certains paramètres de calcul (ex. dans Syst'N®, les paramètres de calcul de la cinétique de minéralisation de N).

Les variables étudiées et leur gamme de variation sont indiquées par la suite en fonction de chaque outil.

La démarche mise en œuvre visait à être la plus commune possible en faisant varier un facteur après l'autre, sauf pour l'analyse de sensibilité du module minéralisation de Syst'N®. Les détails de la procédure d'analyse de sensibilité ont été adaptés aux spécificités de chaque outil. Pour que les outils soient étudiés de façon homogène, des combinaisons communes aux différents outils (sol × climat × cultures) contrastées et réalistes, ont été sélectionnées pour tester les outils dans des conditions variées. En effet, il ne pouvait être *a priori* exclu que la sensibilité des outils soit dépendante de leur contexte d'utilisation. Pour chacun des 4 sites choisis (Aquitaine, Alsace, Picardie, Bretagne), 1 à 3 types de sol ont été sélectionnés, à chacun desquels une succession culturale type a été associée, et deux années climatiques contrastées ont été considérées.

Les contextes pédoclimatiques et systèmes de cultures associés définissant les divers cas à traiter sont résumés dans le tableau 3. La description précise de ces « contextes » (cf. annexe 2-Description contextes regio.xls) constitue un livrable en soi puisque ceux-ci peuvent être remobilisés facilement pour d'autres tests.

Région	Sol	Rotation	N° de situation
Aquitaine	Boulbène	Maïs grain irrigué paille restituée - soja irrigué paille restituée - blé paille restituée	1 – Aqu1
	Terrefort	Sorgho paille restituée - tournesol paille restituée - blé dur paille restituée	2 – Aqu2
Alsace	Ried	Maïs grain irrigué paille restituée	3 – Als1
	Limon	Maïs grain paille restituée	4 – Als2
Picardie	Limon moyen	Blé paille exportée - betteraves verts restitués	5 – Pic1
	Limon argileux	Betteraves verts restitués - maïs grain paille restituée	6 – Pic2
Bretagne	Limon sur schistes	Maïs grain paille restituée - blé paille exportée - triticales paille exportée	7 – Bre1

**Tableau 3** : Contexte pédoclimatique et système de culture des 7 cas étudiés pour les analyses de sensibilité.

### o étapes et calendrier

Ce volet 1 s'est déroulé en deux phases, initialement prévues sur la deuxième année du projet, mais qui ont duré tout au long du projet :

- Phase 1 (2010-2011) : analyse de sensibilité des outils d'aide à la décision aux paramètres d'entrée caractérisant les effluents, pour la détermination du niveau d'information et de précision requis par les outils ;
- Phase 2 (2012 et début 2013) : élaboration d'un cahier des charges de la typologie des effluents d'élevage nécessaire à chaque outil. Cette phase n'a pu être menée à terme car d'une part ce ne sont pas des typologies qui ont pu être testées dans les analyses de sensibilité des outils, et d'autre part il a été conclu qu'une typologie d'effluents commune n'avait pas forcément de pertinence.

### o organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés

Ce volet a été coordonné par le LDAR et l'INRA de Rennes. Leurs partenaires étaient l'INRA de Laon, l'INRA de Bordeaux et Arvalis.

Coordonnateurs : Nathalie Damay (LDAR) et Virginie Parnaudeau (INRA SAS de Rennes)

Participants aux travaux :

- INRA : Virginie Parnaudeau (SAS Rennes), Pascal Denoroy (TCEM Bordeaux), Jean-Marie Machet (AgroImpact Laon)
- LDAR : Nathalie Damay, Caroline Le Roux, Julien Gaillard
- Arvalis : Robert Trochard essentiellement, avec les appuis ponctuels de Christine Le Souder et Alain Bouthier

Les Instituts techniques animaux ont fourni des données de caractérisation des effluents d'élevage :

- ITAVI : Claude Aubert
- Institut de l'Élevage : Alicia Charpiot
- IFIP : Pascal Levasseur

Le travail sur le volet 1 a donné lieu à 11 réunions (physiques, téléphoniques ou en visio-conférences).

En fin de deuxième année du projet, un retard a été constaté sur ce volet du fait d'une sous-estimation initiale (i) du temps de collecte, d'analyse et de formalisation des différentes données utilisées pour les analyses de sensibilité et (ii) du temps de travail global nécessaire pour réaliser les objectifs du volet. En outre, la disponibilité de chacun n'a pas été aussi importante que prévue. Par ailleurs, le retard pris sur la construction de l'outil Syst'N® n'a pas permis de réaliser toutes les analyses prévues.

*La méthode détaillée et les résultats étant propres à chaque outil du fait de leurs spécificités respectives, la suite du rapport de ce volet est structurée par outil.*

## Démarche et résultats pour l'outil AzoFert®

### METHODOLOGIE APPLIQUEE A AZOFERT®

L'analyse de sensibilité du logiciel AzoFert® a porté exclusivement sur (i) le poste des contributions en azote de produits organiques exogènes (Ma) et (ii) sur la dose d'engrais minéral à apporter calculée (X).

Compte-tenu des relations mathématiques entre ces postes et les variables explicatives (de nature linéaire ou proche), le critère retenu pour illustrer la sensibilité est la pente (coefficient a de l'équation  $y = ax+b$ ).

Les variables explicatives sur lesquelles l'analyse de sensibilité a été réalisée sont :

- la **dose d'apport** du produit organique (t ou m<sup>3</sup>/ha)
- la **teneur en azote organique** du produit (kg/t)
- la **teneur en azote minéral** du produit (kg/t)
- la **teneur en carbone organique** du produit (kg/t)

Afin d'affiner les résultats obtenus, le calcul des pentes a également été réalisé en distinguant (i) la famille du produit organique, (ii) la période d'apport, (iii) les caractéristiques climatiques et (iv) la parcelle (qui traduit les effets cumulés d'autres variables telles que le type de sol, la durée du cycle...) puis en croisant, le cas échéant, ces variables agrégatives.

Variables agrégatives	Caractéristiques
Famille de produit organique	Fientes de volailles ( <b>FIV</b> ) Fumier de volailles ( <b>FUV</b> ) Lisier de porcs ( <b>LPO</b> ) Fumier de bovins pailleux ( <b>FBP</b> ) Fumier de bovins décomposés ( <b>FBD</b> )
Période d'apport	Printemps Été
Caractéristiques climatiques	Plomelin « chaud humide » Plomelin « froid sec » Estrées Mons « chaud humide » Estrées Mons « froid sec » Colmar « chaud humide » Colmar « froid sec » Toulouse « chaud humide » Toulouse « froid sec »
Parcelle	Parcelles n°1 à 8

Tableau 4 : Variables agrégatives et caractéristiques utilisées pour l'analyse de sensibilité d'AzoFert®.

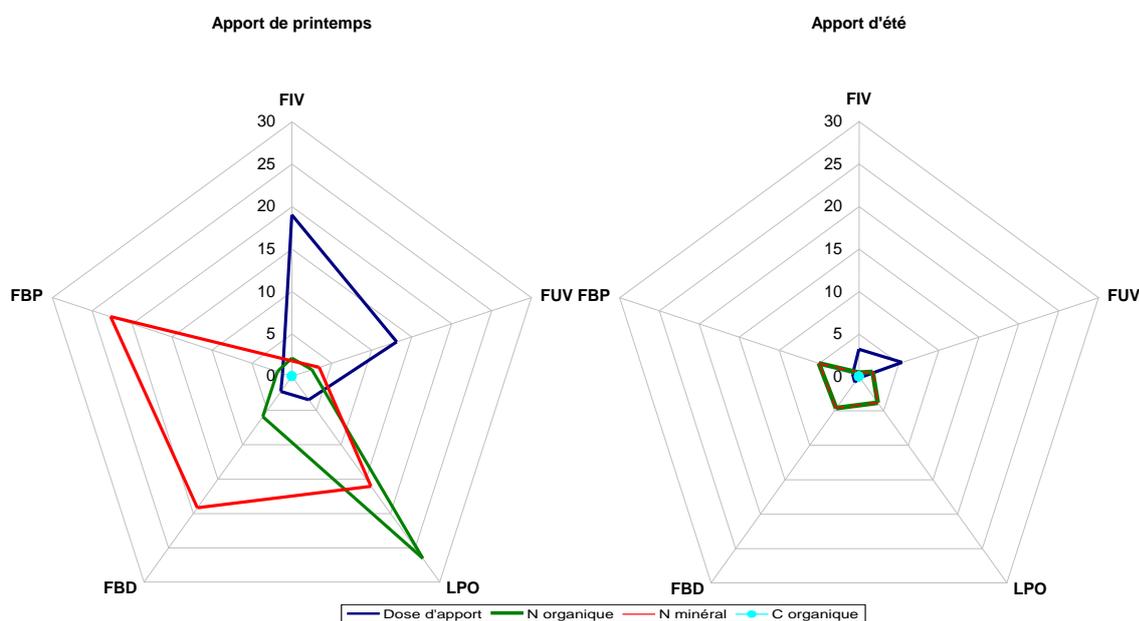
Le jeu de données utilisé a été obtenu par simulations de cas types définis collectivement (démarche commune pour l'ensemble des outils étudiés).

Il faut noter que ces cas définis *a priori* se sont avérés insuffisants pour l'étude de sensibilité d'AzoFert® : ils n'ont pas permis une exploitation approfondie de la variabilité des sorties de l'outil (sans compter les données qui ont dû être écartées de l'étude pour cause d'erreur de saisie). Au total, 5 760 simulations ont été réalisées, dont 5 588 utilisables pour l'étude de sensibilité.

### RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE D'AZOFERT® (détails en annexe 3-AS AzoFert.doc)

- Synthèse de l'analyse de sensibilité du poste des contributions des produits organiques (Ma)

La Figure 1 ci-dessous synthétise les résultats de l'analyse de sensibilité du poste (Ma) aux différentes variables testées. Les pentes ont été regroupées par période d'apport et par famille de produit.



**Figure 1 :** Sensibilité du poste Ma aux variables étudiées suivant la date d'apport du produit (pentes moyennes en kg N/ha).  
 Ligne continue : pente positive      Ligne pointillée : pente négative  
 FIV : Fientes de volailles      FUV : Fumier de volailles      LPO : Lisier de porcs  
 FBD : fumier de bovins décomposé      FBP : fumier de bovins pailleux

Il en ressort que d'une manière générale, le poste Ma est beaucoup plus sensible aux caractéristiques du produit organique pour les apports de printemps que pour les apports d'été.

Ceci est principalement lié au mode de calcul des quantités d'azote minéralisé par le logiciel et notamment à l'allure des cinétiques de minéralisation des produits organiques qui présentent des pentes plus marquées en début de minéralisation.

La sensibilité du poste Ma à la dose d'apport est d'autant plus importante que le produit est riche en azote.

La sensibilité du poste Ma aux teneurs en azote organique et minéral est d'autant plus importante que le produit est faiblement pourvu en ces 2 éléments. La superposition des courbes de sensibilité à l'azote organique et minéral pour les apports d'été est due au mode de calcul d'AzoFert® où la teneur en azote organique est calculée par différence entre les teneurs en N-total et N-minéral. La pente qui exprime la sensibilité de Ma à la teneur en azote minéral est négative pour les apports d'été.

La teneur en carbone du produit organique n'est pas prise en compte dans le calcul du poste Ma, d'où une sensibilité nulle à cette variable.

L'analyse a montré une sensibilité du poste Ma aux variations des caractéristiques climatiques (pour les années considérées dans le jeu de données) importante pour les apports d'été et nulle pour les apports de printemps. Ceci est dû au fonctionnement d'AzoFert® qui n'utilise les données climatiques annuelles réelles que sur la période précédant la date d'ouverture du bilan. Après l'ouverture du bilan, il s'agit des données climatiques moyennes.

L'analyse de sensibilité a bien montré des variations suivant les parcelles, mais le jeu de données utilisé s'est avéré insuffisant pour mettre en avant le rôle d'une variable déterminée dans cette variabilité.

Les tableaux 5 à 7, suivants présentent les valeurs de pentes moyennes calculées pour les différentes variables (en valeur et en proportion de Ma).

#### i. Sensibilité à la dose d'apport (QTAO)

La relation entre Ma et la dose d'apport est linéaire de type :  $Ma = QTAO \times A$

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste Ma pour 1 t ou m³/ha de variation de la dose d'apport	
		en valeur	en % de Ma
<b>Type de PRO</b>			
FIV		12 kgN/ha ± 8.7	26 % ± 18
FUV		10 kgN/ha ± 4.6	17 % ± 8
LPO		2 kgN/ha ± 1.8	3 % ± 2

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste Ma pour 1 t ou m³/ha de variation de la dose d'apport	
		en valeur	en % de Ma
FBD		2 kgN/ha ± 0.8	4 % ± 2
FBP		1 kgN/ha ± 0.4	4 % ± 2
Date d'apport			
Printemps		8 kgN/ha ± 7.4	11 % ± 10
Eté		2 kgN/ha ± 2.4	12 % ± 13
Type de PRO X Date d'apport			
FIV	Printemps	19 kgN/ha ± 4.8	26 % ± 6
	Eté	3 kgN/ha ± 1.7	25 % ± 13
FUV	Printemps	13 kgN/ha ± 2.7	17 % ± 4
	Eté	5 kgN/ha ± 2.2	17 % ± 7
LPO	Printemps	3 kgN/ha ± 0.9	3 % ± 1
	Eté	< 1 kgN/ha ± 0.1	3 % ± 2
FBD	Printemps	2 kgN/ha ± 0.4	4 % ± 1
	Eté	1 kgN/ha ± 0.5	4 % ± 2
FBP	Printemps	1 kgN/ha ± 0.3	4 % ± 1
	Eté	1 kgN/ha ± 0.4	4 % ± 2

**Tableau 5 :** Variation du poste effet direct des apports organiques (Ma) pour 1 t ou m3 de variation de la dose d'apport pour les différentes variables d'agrégation.

### ii. Sensibilité à la teneur en azote organique (NORG)

La relation entre Ma et la teneur en azote organique est linéaire ( $Ma = NORG \times A$ ) pour les apports d'été et affine ( $Ma = NORG \times A' + B$ ) pour les apports de printemps.

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste Ma pour 1 kg/t de variation de la teneur en azote organique	
		en valeur	en % de Ma
		6 kgN/ha ± 9.0	12 % ± 18
Type de PRO			
LPO		18 kgN/ha ± 14.2	24 % ± 19
FBD		5 kgN/ha ± 2.3	12 % ± 5
FBP		3 kgN/ha ± 2.3	12 % ± 9
FUV		2 kgN/ha ± 1.1	4 % ± 2
FIV		1 kgN/ha ± 1.0	3 % ± 2
Date d'apport			
Printemps		8 kgN/ha ± 11.0	11 % ± 16
Eté		3 kgN/ha ± 2.6	16 % ± 14
Type de PRO X date d'apport			
LPO	Printemps	27 kgN/ha ± 11.2	23 % ± 10
	Eté	4 kgN/ha ± 2.2	71 % ± 42
FBD	Printemps	6 kgN/ha ± 2.1	11 % ± 4
	Eté	5 kgN/ha ± 2.4	21 % ± 11
FBP	Printemps	2 kgN/ha ± 0.9	6 % ± 3
	Eté	5 kgN/ha ± 2.6	25 % ± 13
FUV	Printemps	3 kgN/ha ± 1.1	3 % ± 1
	Eté	2 kgN/ha ± 1.0	5 % ± 3
FIV	Printemps	2 kgN/ha ± 0.7	3 % ± 1
	Eté	<1 kgN/ha ± 0.2	3 % ± 2

**Tableau 6 :** Variation du poste effet direct des apports organiques (Ma) pour une variation de la teneur en N organique pour les différentes variables d'agrégation.

### iii. Sensibilité à la teneur en azote minéral (NMORG)

La relation entre Ma et la teneur en azote minéral est de type linéaire ( $Ma = NMORG \times C$ ) avec une pente positive pour les apports de printemps et négative pour les apports d'été.

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste Ma pour 1 kg/t de variation de la teneur en azote minéral	
		en valeur	en % de Ma
		7 kgN/ha ± 11.1	13 % ± 22
Date d'apport			
Printemps		13 kgN/ha ± 9.9	18 % ± 14
Eté		-3 kgN/ha ± 2.6	-16 % ± 14
Type de PRO X date d'apport			
FBP	Printemps	23 kgN/ha ± 7.7	80 % ± 27
	Eté	-5 kgN/ha ± 2.6	-25 % ± 13

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste Ma pour 1 kg/t de variation de la teneur en azote minéral	
		en valeur	en % de Ma
FBD	Printemps	19 kgN/ha ± 6.2	34 % ± 11
	Eté	-5 kgN/ha ± 2.4	-21 % ± 11
LPO	Printemps	16 kgN/ha ± 5.9	14 % ± 5
	Eté	-4 kgN/ha ± 2.2	-71 % ± 42
FUV	Printemps	3 kgN/ha ± 1.5	4 % ± 2
	Eté	-2 kgN/ha ± 1.0	-5 % ± 3
FIV	Printemps	2 kgN/ha ± 0.6	2 % ± 1
	Eté	<1 kgN/ha ± 0.2	-3 % ± 2

**Tableau 7 :** Variation du poste effet direct des apports organiques (Ma) pour 1 kg de variation de la teneur en N minéral pour les différentes variables d'agrégation.

- Synthèse de l'analyse de sensibilité de la dose d'engrais azoté à apporter (X)

La dose d'azote X à apporter est calculée d'après la méthode du bilan prévisionnel selon l'équation :

$$X = (Pf - Pi + Rf + Ix + Gx + Ls) - (Ri + Mh + Mr + Mci + Ma + Mp + Ap + Fs + Ir)$$

Pf : besoins en azote

Pi : azote absorbé à l'ouverture

Rf : reliquat fermeture

Ix : organisation microbienne

Gx : volatilisation

Ls : lessivage

Ri : reliquat à l'ouverture

Mh : minéralisation de l'humus

Mr : résidus de culture

Mci : cultures intermédiaires

Ma : amendements

Mp : retournement de prairie

Ap : apports par précipitations

Fs : fixation symbiotique

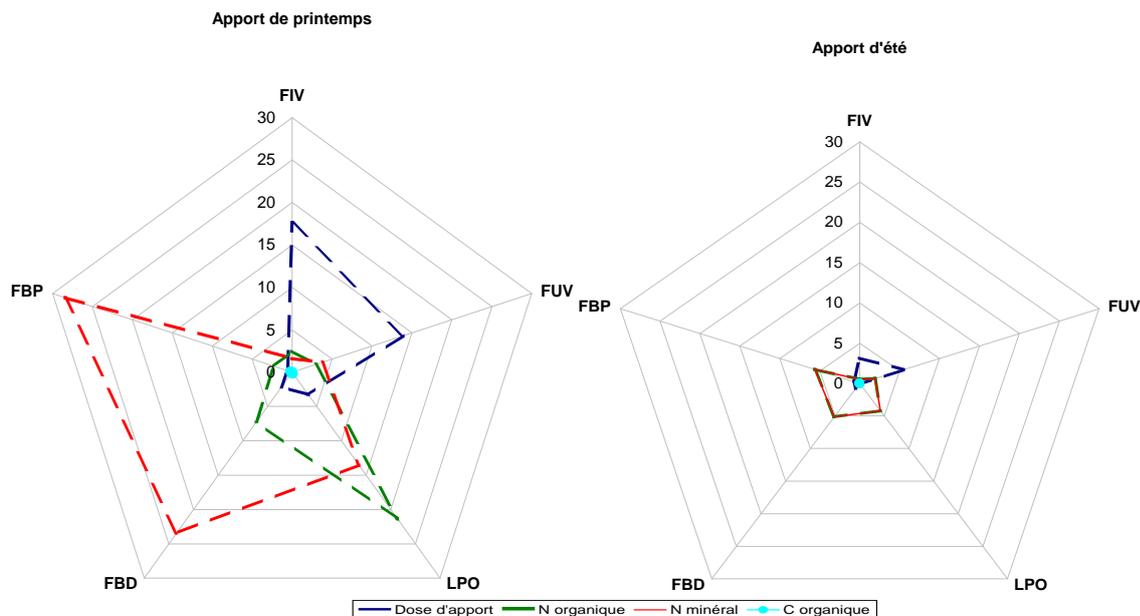
Ir : apport par l'irrigation

D'un point de vue fonctionnel, la dose X ne peut être estimée par le moteur de calcul qu'une fois les autres postes calculés. Les postes Ix et Gx (organisation de l'azote de l'engrais et volatilisation de l'azote de l'engrais) étant établis sur la base de la dose à apporter, le logiciel tourne donc en trois fois :

- 1- calcul d'une première dose partielle (X1) avant Ix et Gx
- 2- calcul d'une seconde dose partielle (X2) avant Gx mais après Ix
- 3- calcul de la dose finale X après Ix et Gx

Les variables agissant sur le poste Ma auront donc un effet sur le poste X mais également sur les postes Ix et Gx (effets non cumulatifs).

La Figure 2 synthétise les résultats de l'analyse de sensibilité du poste X aux différentes variables testées. Comme précédemment, les pentes ont été regroupées par période d'apport et par famille de produit.



**Figure 2 :** Sensibilité du poste X aux variables testées suivant la date d'apport du produit (pentes moyennes en kg N/ha).  
Ligne continue : pente positive, Ligne pointillée : pente négative, **FIV** : Fientes de volailles, **FUV** : Fumier de volailles, **LPO** : Lisier de porcs **FBD** : fumier de bovins décomposé, **FBP** : fumier de bovins pailleux.

Les graphiques présentent la même allure que pour le poste Ma, ce qui traduit l'importance du poste Ma dans le calcul de la dose d'azote, mais avec une inversion puisque Ma est une contribution à la dose d'azote.

Comme précédemment, la sensibilité de la dose X aux variables testées est beaucoup plus importante pour les apports de printemps que pour les apports d'été.

La sensibilité du poste X à la dose d'apport est d'autant plus importante que le produit est riche en azote.

La sensibilité du poste X aux teneurs en azote organique et minéral est d'autant plus importante que le produit est faiblement pourvu en ces 2 éléments.

La prise en compte des postes Ix et Gx dans le calcul de la dose X se traduit par des effets plus ou moins exacerbés sur sa sensibilité suivant les variables et les produits comparativement à la sensibilité au poste Ma.

La teneur en carbone du produit organique n'entre pas en compte dans le calcul du poste Ma mais impacte directement le poste de l'organisation microbienne (Ix) et donc le poste X. Néanmoins, au vu des grandeurs mises en jeu, la sensibilité du poste X à cette variable reste très limitée.

L'analyse a montré une sensibilité du poste X aux variations des caractéristiques climatiques (pour les années considérées dans le jeu de données) très variable. A noter que le poste le plus impacté est l'organisation microbienne de l'azote de l'engrais (Ix).

Tout comme pour le poste Ma, l'analyse de sensibilité du poste X a bien montré des variations suivant les parcelles, mais le jeu de données utilisé s'est également avéré insuffisant pour mettre en avant le rôle d'une variable déterminée dans cette variabilité.

Les tableaux suivants présentent les valeurs de pentes moyennes calculées pour les différentes variables (en valeur et en proportion de X).

#### i. Sensibilité à la dose d'apport (QTAO)

La relation entre Ma et la dose d'apport est parabolique de type :  $X = QTAO^2 \times A + QTAO \times B + C$

Néanmoins, pour le domaine de valeur possible de QTAO, on peut approximer cette relation par une fonction affine ( $X = QTAO \times A' + B'$ ) et calculer les pentes illustrant la sensibilité de X à la dose d'apport.

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste X pour 1 t ou m³/ha de variation de la dose d'apport	
		en valeur	en % de X
<b>Type de PRO</b>			
FIV		-11 kgN/ha ± 7.4	-13 % ± 9
FUV		-10 kgN/ha ± 5.0	-13 % ± 7
LPO		-2 kgN/ha ± 1.6	-3 % ± 2
FBD		-2 kgN/ha ± 0.8	-2 % ± 1
FBP		-1 kgN/ha ± 0.5	-1 % ± 0
<b>Date d'apport</b>			
Printemps		-7 kgN/ha ± 7.0	-10 % ± 9
Eté		-2 kgN/ha ± 2.5	-2 % ± 2
<b>Type de PRO X Date d'apport</b>			
FIV	Printemps	-18 kgN/ha ± 2.0	-26 % ± 3
	Eté	-3 kgN/ha ± 1.8	-3 % ± 2
FUV	Printemps	-14 kgN/ha ± 3.1	-21 % ± 5
	Eté	-6 kgN/ha ± 2.3	-6 % ± 3
LPO	Printemps	-3 kgN/ha ± 0.7	-8 % ± 2
	Eté	-0.1 kgN/ha ± 0.1	-0.1 % ± 0
FBD	Printemps	-2 kgN/ha ± 0.5	-3 % ± 1
	Eté	-1 kgN/ha ± 0.5	-1 % ± 1
FBP	Printemps	-1 kgN/ha ± 0.5	-0.5 % ± 1
	Eté	-1 kgN/ha ± 0.4	-1 % ± 0.4

**Tableau 8** : Variation de la dose conseillée (X) pour 1 t ou m³ de variation de la dose d'apport pour les différentes variables d'agrégation.

#### ii. Sensibilité à la teneur en azote organique (NORG)

La relation entre X et la teneur en azote organique est affine ( $X = NORG \times A + B$ ).

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste X pour 1 kg/t de variation de la teneur en azote organique	
		en valeur	en % de Ma
<b>Type de PRO</b>			
LPO		-15 kgN/ha ± 10.6	-22 % ± 15
FBD		-7 kgN/ha ± 2.9	-7 % ± 3
FBP		-4 kgN/ha ± 2.6	-3 % ± 2
FUV		-3 kgN/ha ± 1.3	-3 % ± 2
FIV		-2 kgN/ha ± 1.2	-2 % ± 1
<b>Date d'apport</b>			
Printemps		-7 kgN/ha ± 8.4	-10 % ± 11
Eté		-3 kgN/ha ± 2.9	-3 % ± 3
<b>Type de PRO X date d'apport</b>			
LPO	Printemps	-21 kgN/ha ± 8.0	-54 % ± 20
	Eté	-4 kgN/ha ± 2.5	-4 % ± 2
FBD	Printemps	-5 kgN/ha ± 2.8	-9 % ± 3
	Eté	-7 kgN/ha ± 2.7	-5 % ± 3
FBP	Printemps	-6 kgN/ha ± 3.0	-2 % ± 1
	Eté	-2 kgN/ha ± 1.2	-5 % ± 3
FUV	Printemps	-3 kgN/ha ± 1.4	-4 % ± 2
	Eté	-2 kgN/ha ± 1.1	-2 % ± 1
FIV	Printemps	-3 kgN/ha ± 0.8	-4 % ± 1
	Eté	-1 kgN/ha ± 0.3	-0.5 % ± 0.2

**Tableau 9** : Variation de la dose conseillée (X) pour une variation de la teneur en N organique pour les différentes variables d'agrégation.

### iii. Sensibilité à la teneur en azote minéral (NMORG)

La relation entre X et la teneur en azote minéral est affine ( $X = NMORG \times A + B$ ).

Variable d'agrégation n°1	Variable d'agrégation n°2	Variation du poste X pour 1 kg/t de variation de la teneur en azote minéral	
		en valeur	en % de Ma
<b>Date d'apport</b>			
Printemps		-15 kgN/ha ± 12.4	-20 % ± 17
Eté		3 kgN/ha ± 2.9	3 % ± 3
<b>Type de PRO X date d'apport</b>			
FBP	Printemps	-28 kgN/ha ± 10.3	-25 % ± 9
	Eté	-6 kgN/ha ± 3.0	5 % ± 3
FBD	Printemps	-23 kgN/ha ± 8.0	-29 % ± 10
	Eté	-5 kgN/ha ± 2.8	5 % ± 3
LPO	Printemps	-14 kgN/ha ± 5.9	-34 % ± 15
	Eté	4 kgN/ha ± 2.5	4 % ± 2
FUV	Printemps	-4 kgN/ha ± 1.7	-6 % ± 3
	Eté	2 kgN/ha ± 1.1	2 % ± 1
FIV	Printemps	-2 kgN/ha ± 0.6	-2 % ± 1
	Eté	1 kgN/ha ± 0.3	0.5 % ± 0.2

**Tableau 10** : Variation de la dose conseillée (X) pour 1 kg de variation de la teneur en N minéral pour les différentes variables d'agrégation.

### iv. Sensibilité à la teneur en carbone organique (CORG)

La relation entre X et la teneur en carbone organique est affine ( $X = CORG \times A + B$ ).

Variable d'agrégation n°1	Variable 3 d'agrégation n°2	Variation du poste X pour 1 kg/t de variation de la teneur en carbone organique	
		en valeur	en % de Ma
<b>Type de PRO</b>			
FBD		0.2 kgN/ha ± 0.1	0.1 % ± 0.1
LPO		0.2 kgN/ha ± 0.1	0.2 % ± 0.2
FBP		0.1 kgN/ha ± 0.1	0.2 % ± 0.1
FUV		NS	NS
FIV		NS	NS

Variable d'agrégation n°1	Variable 3 d'agrégation n°2	Variation du poste X pour 1 kg/t de variation de la teneur en carbone organique	
		en valeur	en % de Ma
Date d'apport			
Printemps		0.2 kgN/ha ± 0.1	0.2 % ± 0.2
Eté		NS	NS
Type de PRO X date d'apport			
LPO	Printemps	0.2 kgN/ha ± 0.1	0.6 % ± 0.2
	Eté	NS	NS
FBD	Printemps	0.2 kgN/ha ± 0.1	0.2 % ± 0.1
	Eté	NS	NS
FBP	Printemps	0.3 kgN/ha ± 0.1	0.2 % ± 0.1
	Eté	NS	NS
FUV	Printemps	NS	NS
	Eté	NS	NS
FIV	Printemps	NS	NS
	Eté	NS	NS

**Tableau 11 :** Variation de la dose conseillée (X) pour 1 kg de variation de la teneur en carbone organique pour les différentes variables d'agrégation (NS : non significatif).

### CONCLUSION POUR AZOFERT®

Compte-tenu des relations mathématiques entre les postes étudiés et les variables explicatives, le calcul des pentes s'est avéré une bonne méthode d'approche de cette sensibilité. Cependant, le choix d'un jeu de données commun aux autres outils a limité les possibilités d'étude de la sensibilité d'AzoFert®.

Il en ressort néanmoins 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).

### Démarche et résultats pour l'outil Syst'N®

#### METHODOLOGIE APPLIQUEE A 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. Les formalismes sont issus de modèles de cultures tels que STICS (Brisson *et al.*, 1998, Brisson *et al.*, 2008), Azodyn (Jeuffroy et Recous, 1999), Azofert (Machet *et al.*, 2001), Volt'air (Génermont, 1997), qui ont parfois été adaptés. Le modèle effectue les calculs au pas de temps journalier, et permet de simuler une succession de cultures.

Pour Syst'N®, deux types d'analyse de sensibilité ont été réalisées : l'une en particulier sur le module « minéralisation des effluents », et l'autre sur l'outil « complet ».

#### Analyse de sensibilité du module « minéralisation de l'azote des PRO » de Syst'N®

Cette première analyse de sensibilité est destinée à évaluer la sensibilité des valeurs de minéralisation des PRO aux paramètres de calculs de la cinétique de minéralisation, fixés pour chaque type d'effluents.

Description du module :

La cinétique de minéralisation nette de l'azote des effluents organiques est issue de travaux antérieurs (Machet *et al.*, 2002 ; Nicolardot *et al.*, 2001),

$$N_j = N_{Eff0} \left( \alpha_N - \beta_N e^{-K_{Eff} j} - \gamma_N e^{\lambda j} \right)$$

Avec :  $N_j$  = minéralisation nette au jour j

$N_{Eff0}$  = quantité d'azote organique apporté par l'effluent

$\alpha_N, \beta_N, \gamma_N, K_{Eff}, \lambda$  = paramètres

On a :  $\alpha_N = \beta_N + \gamma_N$

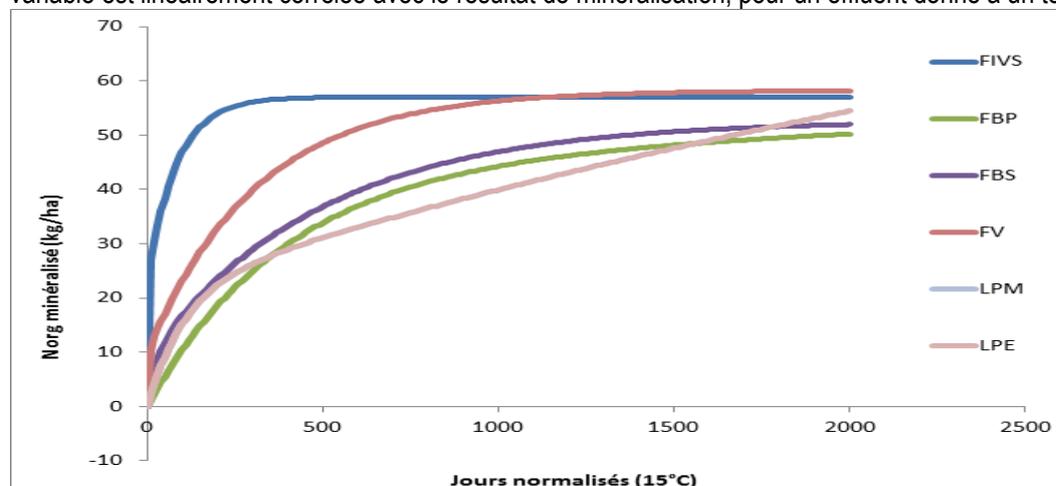
Avec les valeurs actuelles des paramètres, la cinétique de minéralisation des différents effluents est modélisée comme cela est représenté en Figure 3.

Ce qui est analysé dans cette étude est bien le potentiel de minéralisation : il n'est pas tenu compte du climat, de la disponibilité en azote (qui sont par ailleurs pris en compte dans Syst'N®).

Variables d'entrée et paramètres sur lesquels l'analyse est réalisée :

$$\beta_N, \gamma_N, K_{\text{Eff}}, \lambda = \text{paramètres (on rappelle : } \alpha_N = \beta_N + \gamma_N)$$

On ne réalise pas l'analyse sur  $N_{\text{Effo}}$  (quantité d'azote organique contenu dans l'effluent apporté) car cette variable est linéairement corrélée avec le résultat de minéralisation, pour un effluent donné à un temps donné.



**Figure 3 :** Cinétiques de minéralisation des différents types d'effluents dans Syst'N® (apport N organique = 100 kgN/ha). Les cinétiques LPE et LMP sont confondues.

On veut connaître les paramètres de calcul qui influencent le plus les résultats de minéralisation. On choisit  $\beta_N, \gamma_N, K_{\text{Eff}}, \lambda =$  distributions uniformes.

### Méthode choisie

Sur un module constitué par une équation unique et seulement quelques paramètres, on peut envisager des méthodes relativement sophistiquées. La méthode retenue (Wallach *et al.*, 2006) est une analyse de variance, car les interactions entre paramètres peuvent être importantes : on estime la part de chaque variable ou interaction de variables dans la variance des résultats. Ici on considère la sortie % de N minéralisé à 3 dates. On calcule un indice de sensibilité SI de la variable  $z_i$  :

$$\text{Ex. SI}(z_i) = \sqrt{Vz_i} / \text{Var}[y(z)]$$

Cette méthode est implémentée sous le logiciel R.

### RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE DE SYST'N® (détails en annexe 4-AS Syst'N.docx)

Le tableau 12 montre que le paramètre  $\beta_N$  contribue pour 51% à la variance des résultats du modèle, et l'interaction  $K_{\text{Eff}}:\beta_N$  pour 25 %. Les autres paramètres ont un effet beaucoup moins important. On notera que ces contributions ne varient pas quelle que soit l'amplitude de variation des paramètres choisie.

Il faut donc optimiser le paramètre  $\beta_N$  avec beaucoup de soin et tenir compte du fait qu'il est corrélé avec le paramètre  $K_{\text{Eff}}$ .

Indices	
$\beta_N$	50.9
$K_{\text{Eff}}:\beta_N$	25.4
$\gamma_N$	7.5
$K_{\text{Eff}}$	7.0
$\lambda$	5.1
$\lambda:\gamma_N$	4.1

**Tableau 12 :** Indices de sensibilité (% de la variance totale).

## Positionnement de la question initiale

Dans la description des ITK de Syst'N®, comme dans AzoFert®, l'outil propose à l'utilisateur un choix de types d'effluents. L'utilisateur doit ensuite fournir : la dose et la date d'épandage, et l'outil de travail du sol servant à l'enfouissement. Il peut également renseigner plusieurs champs décrivant l'effluent : %MS, %N total, % N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ; ces valeurs sont néanmoins proposées par défaut au cas où l'utilisateur ne les aurait pas. En effet, un catalogue de paramètres inclus dans le simulateur renferme des variables décrivant les effluents, ainsi que des paramètres de calcul propres à chaque type d'effluents (ex. paramètres de calcul de la minéralisation).

Les sorties de l'outil que nous avons examinées sont : lixiviation, absorption d'azote par les cultures et minéralisation.

**Question : Dans un contexte donné, pour un effluent donné, quelle est l'influence sur les sorties du modèle d'une imprécision dans la description de l'épandage ou de l'effluent ? (cf. annexe 4 AS Syst'N)**

Syst'N® n'étant pas encore paramétré pour toutes les cultures, certains systèmes n'ont pas pu être pris en compte. L'analyse a été réalisée sur les situations suivantes :

- Als1 : Monoculture de maïs grain irriguée ; région de Colmar ; 1995-2010 ;
- Bret1 : Rotation Maïs/blé/orge/CIPAN ; région Rennes.

## Caractéristiques des effluents d'élevage testés et doses d'épandage

En plus des effluents choisis pour l'ensemble des outils, pour Syst'N®, le type lisier de porc a été scindé en « engraissement » et « mixte ». Les gammes de variation des teneurs et de la dose de chaque effluent ont été extraites de données des instituts techniques ou d'experts de chambre d'agriculture. Pour le NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, il a été choisi de la faire varier en proportion du N total (même proportion que la valeur par défaut dans l'outil) pour ne pas obtenir d'incohérence.

## Plan de simulations

Le fait d'avoir des rotations de plusieurs cultures différentes pose quelques questions quant à la restitution des résultats. Si l'on a par exemple une rotation maïs / blé / orge + CIPAN, un effluent d'élevage peut être apporté sur chacune des cultures. Si l'on ne fait varier que les caractéristiques du fumier apporté sur maïs par exemple, l'effet de cette variation sur la lixiviation annuelle va être faible car l'apport n'est effectué que tous les 3 ans. Si l'on veut faire varier tous les apports de chaque type d'effluents sur les 4 cultures, le nombre de combinaisons est trop important et la variation obtenue difficile à comprendre en étudiant les résultats.

Nous avons donc envisagé 2 démarches de simulation pour cette analyse de sensibilité :

- Pour la monoculture de maïs (cas Alsace\_1), les résultats seront exprimés de manière relativement standard, en variation des sorties en fonction de la variation des entrées, sur l'ensemble de la période 1995-2010 ;
- Pour les rotations de plusieurs cultures (cas Bret1), l'analyse de sensibilité est réalisée sur une période allant de la récolte du précédent de la culture considérée, à la fin de la période de drainage suivant la culture considérée. La rotation est donc « découpée » en segments précédent-suivant ; ces simulations de 2-3 ans sont réalisées en considérant deux années de début de simulation contrastées en termes climatiques.

### Als1 : Monoculture de maïs grain irriguée ; région de Colmar

Simulation sur la période : 1995-2010

Maïs/maïs/...

Epandage de fumier de bovin (FBS et FBP) avant semis de chaque maïs.

Pour le cas de la monoculture de maïs en Alsace, les résultats de ces 3 sorties sont exprimés en kg N/ha/an (moyenne annuelle calculée sur l'ensemble de la simulation).

### Bret1 : Rotation Maïs/blé/orge/CIPAN ; région de Rennes

Deux dates de début de simulation : 2000 et 2003 (années contrastées en termes de pluviométrie). La simulation est initialisée pour toutes situations avec 40 kg N minéral/ha sur une profondeur de 60 cm.

Les résultats sont au final exprimés en variation des différentes sorties en kg N/ha et par période considérée, en fonction de la variation soit de la dose (pour une teneur moyenne de l'effluent), soit de la teneur en N total (pour une dose moyenne d'apport pour l'effluent). Un tableau est présenté pour chaque type d'apport et la culture concernée.

## Résultats

*Situation : monoculture de maïs irriguée dans la région de Colmar (Als1)*

La sensibilité de la lixiviation annuelle à la variation de teneur en N total du fumier de bovin pailleux apporté sur maïs à la teneur en N total augmente en suivant une exponentielle. L'augmentation est d'autant plus importante que la dose est élevée.

Les résultats montrent par exemple que pour une dose de 45 T, l'effet de la variation de la teneur exprimée en % par rapport à une valeur de référence de Ntotal = 0,4 %MF suit une fonction exponentielle :  
 Lixiviation (kg N/ha) =  $41,397e^{0,005x}$ , x étant la variation en %.

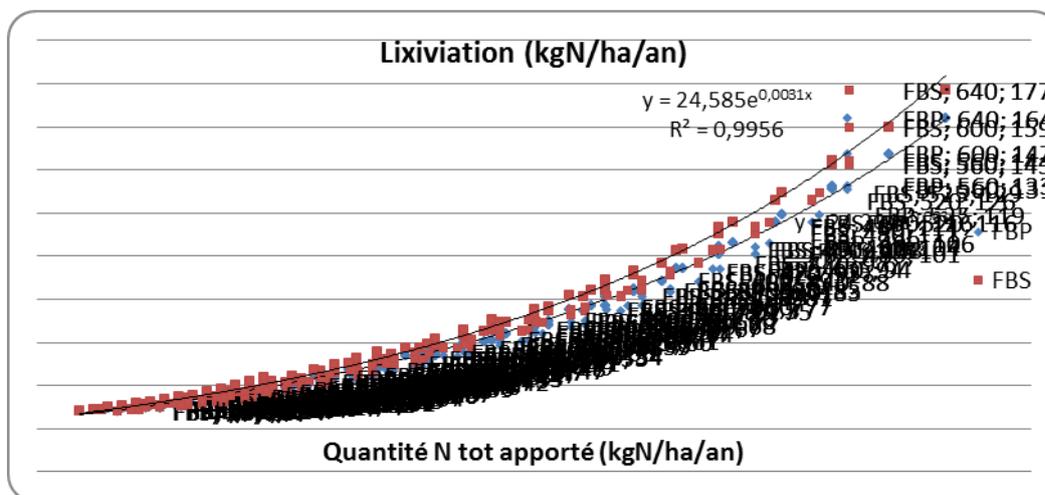
On peut utiliser ces fonctions pour calculer le % de variation sur la lixiviation induit par un % de variation de la teneur (Tableau 13).

**Exemple (dose = 45 T MF/ha) :**

Variation teneur en % de la teneur en N total	Lixiviation (kg N/ha)	Variation de la lixiviation (kg N/ha)	Variation de la lixiviation en %
-75	28	-13	-31
-50	32	-9	-22
-25	37	-5	-12
-10	39	-2	-5
0	41	0	0
10	44	2	5
25	47	6	13
50	53	12	28
75	60	19	45

**Tableau 13:** Traduction en % de variation de la lixiviation en fonction du % de variation de la teneur en N total.

Le même type de résultats est obtenu pour le fumier bovin stocké. On constate une forte interaction entre l'effet de la dose et celle de la teneur en N total, qui peut être « intégrée » en une variable : quantité total d'azote apporté. On peut alors établir une relation entre quantité d'azote apportée et lixiviation (figure 4), qui est valable pour un effluent et un contexte.



**Figure 4 :** Relation entre la quantité apportée et la lixiviation, par type de fumier de bovin (FBP : pailleux et FBS : stocké) et pour la situation Als1.

Pour évaluer l'effet de la variation des facteurs sur les sorties pour une rotation, le problème se complexifie car il peut y avoir un nombre trop important de combinaisons. Les résultats sont donc restitués de façon différente.

*Situation : rotation maïs-blé-orge avec CIPAN dans la région de Rennes (Bret1)*

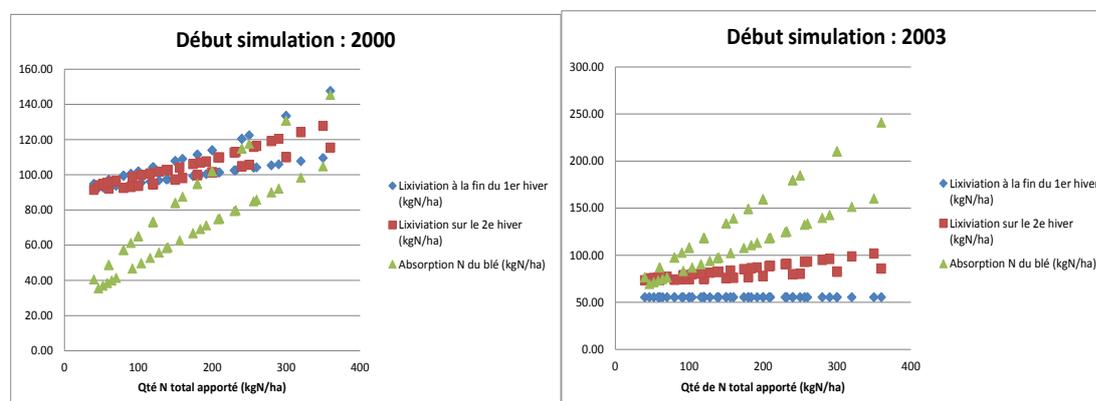
Le drainage calculé par Syst'N® est de 746 mm entre juillet 2000 et juillet 2001, et de 229 mm entre juillet 2001 et avril 2002. Il est de 367 mm entre juillet 2003 et juillet 2004, et de 178 mm entre juillet 2004 et avril 2005.

La minéralisation annuelle varie entre 82 et 103 kg N/an suivant la période de simulation considérée (relative à la culture étudiée) et plus secondairement suivant l'année de début de simulation.

*Résultats généraux*

Quelle que soit la sortie considérée, pour un type d'effluent et pour une année de début de simulation, les résultats sont linéaires, que ce soit en fonction de la dose apportée ou de la teneur en N de l'effluent (ex. figure 3). Cela est notamment dû à la démarche qui ne permet pas d'évaluer l'effet des apports répétés des effluents sur une même parcelle, qui induirait probablement un effet exponentiel comme dans le cas Als1. L'autre explication est une réponse linéaire de l'absorption des cultures à la quantité d'azote apporté, ce qui induit une lixiviation également linéaire en fonction de la dose. La seule exception dans le cas Bret1 est l'absorption par les CIPAN avec apport d'effluent avant semis : dans ce cas, l'absorption s'infléchit avec la quantité de N apportée.

Le second résultat est un effet très marqué de l'année. En 2000-2001, la forte pluviométrie qui se poursuit au printemps génère un drainage qui se poursuit jusqu'en mai. Cela signifie qu'un effluent épandu en mars peut avoir des effets en termes de lixiviation dès la 1<sup>ère</sup> période de drainage. En 2003-2004, au contraire, la faible pluviométrie limite la lixiviation qui reste constante pendant le 1<sup>er</sup> hiver quelle que soit la quantité d'azote apportée ou le type d'effluent, et les températures élevées favorisent l'absorption de l'azote par les cultures (ex. figure 5).



**Figure 3 :** Effet de la quantité d'azote total apporté en mars sur blé par FIVS et FV sur différentes sorties de l'outil ; gauche : début de simulation en 2000 ; droite : début de simulation en 2003

L'ensemble des résultats est détaillé en annexe 4. Seuls les résultats relatifs aux apports d'effluents sur blé et sur CIPAN (avant maïs) sont présentés ci-dessous à titre d'exemple.

*Résultats relatifs au blé (apport de FV et LP mars)*

Comme précisé dans les résultats généraux, l'effet de la variation de la dose et de la teneur en N total est plus marqué en 2000 sur la lixiviation. Les tableaux 14 et 15 montrent l'effet de la variation de la dose et de la teneur en N total de l'effluent sur les différentes sorties. On constate un effet de la variation de la teneur plus important sur les effluents dont les teneurs sont les plus faibles (lisiers de porc par rapport aux fumiers ou fientes de volailles).

			Variation de la dose (moyenne quelle que soit la teneur en N total) ; 1 T ou m <sup>3</sup> /ha		Variation de la teneur en N total (moyenne quelle que soit la dose) : 1% MF	
			LPE	LPM	LPE	LPM
2000	Lixiviation 1 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	1.02	1.87	51.52	222.05
	Lixiviation 2 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	0.03	0.16	1.69	19.22
	Absorption blé	kgN/ha/période	1.11	1.40	54.97	160.15
	Minéralisation*	kgN/ha/période	0.17	0.37	8.52	42.73
2003	Lixiviation 1 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	0.00	0.00	0.01	0.03

	kgN/ha/période	Variation de la dose (moyenne quelle que soit la teneur en N total) : 1 T ou m <sup>3</sup> /ha		Variation de la teneur en N total (moyenne quelle que soit la dose) : 1% MF	
		0.01	0.06	0.64	6.75
Lixiviation 2 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	0.01	0.06	0.64	6.75
Absorption blé	kgN/ha/période	2.14	3.33	106.95	388.31
Minéralisation*	kgN/ha/période	0.17	0.36	8.32	41.73

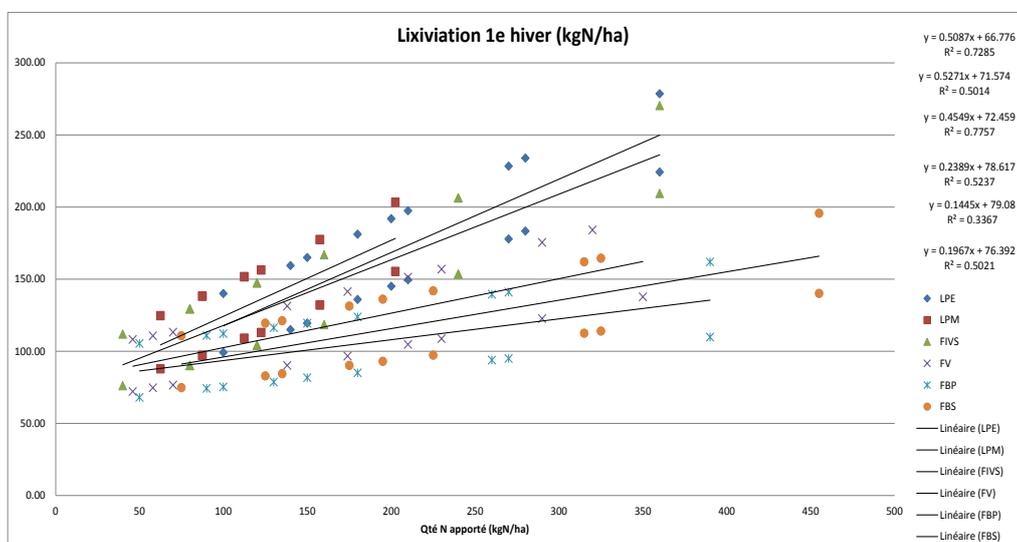
**Tableau 14** : Sensibilité des différentes sorties à la variation de la dose et de la teneur en N total des lisiers de porc.  
(\*Sur la période de croissance du blé)

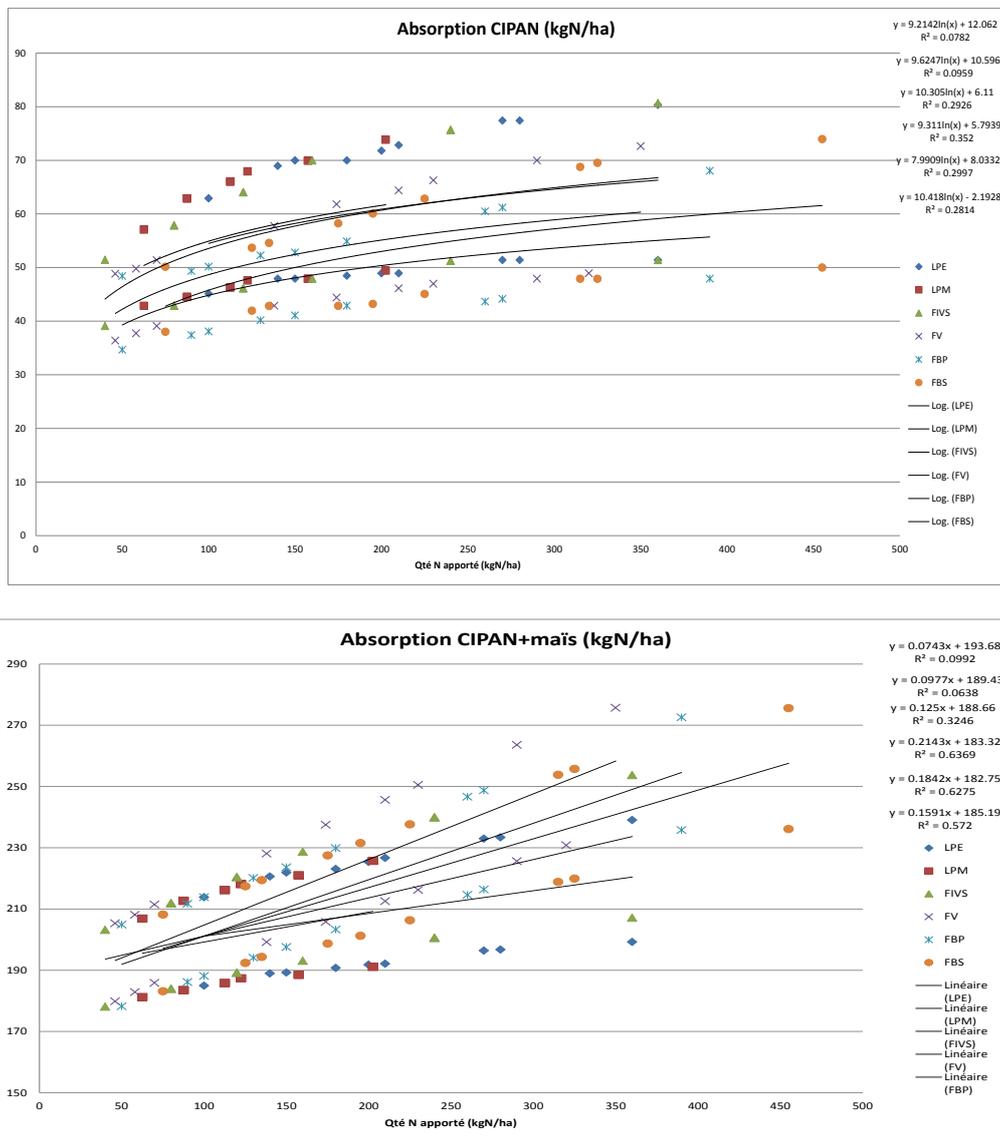
	kgN/ha/période	Variation de la dose (moyenne quelle que soit la teneur en N total) : 1 T ou m <sup>3</sup> /ha		Variation de la teneur en N total (moyenne quelle que soit la dose) : 1% MF	
		FIVS	FV	FIVS	FV
<b>2000</b> Lixiviation 1 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	5.95	1.60	5.95	3.37
Lixiviation 2 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	3.03	3.10	3.03	6.81
Absorption blé	kgN/ha/période	13.72	6.72	13.72	13.53
Minéralisation*	kgN/ha/période	17.85	6.77	17.85	14.00
<b>2003</b> Lixiviation 1 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	0.00	0.00	0.00	0.00
Lixiviation 2 <sup>e</sup> période	kgN/ha/période	1.48	2.49	1.48	5.29
Absorption blé	kgN/ha/période	20.55	8.68	20.55	17.92
Minéralisation*	kgN/ha/période	17.69	6.63	17.69	13.72

**Tableau 15** : Sensibilité des différentes sorties à la variation de la dose et de la teneur en N total d'effluents de volaille.  
(\*Sur la période de croissance du blé)

#### Variation des sorties en fonction de la dose d'azote total apporté (CIPAN)

La figure 6 montre que l'effet de la variation de la quantité totale d'azote apporté est différent d'un type d'effluent à l'autre. Par comparaison avec les résultats précédents, on peut déduire globalement la sensibilité s'accroît dans le cas d'un apport de fin d'été du fait du début de la période de drainage et du fait que les CIPAN peuvent valoriser seulement une quantité limitée d'azote disponible (la courbe s'infléchit avec l'accroissement de la quantité de N apporté), le reste étant lixivié. Pour chaque type d'effluent, on distingue bien l'année 2000 de l'année 2003, mais les pentes des droites restent similaires, sauf pour l'absorption de la CIPAN.





**Figure 4 :** Expression de la variation des sorties (en haut : lixiviation ; au milieu : absorption CIPAN ; en bas : absorption CIPAN+maïs) en fonction de la variation de la quantité de N total apporté avant CIPAN. Les équations sont classées dans le même ordre que la légende.

## CONCLUSIONS POUR SYST'N®

Comme attendu, les effluents avec les teneurs les plus élevées sont ceux qui sont le plus sensibles à la dose. Il est également nécessaire d'avoir une précision sur la teneur plus importante sur les effluents dont la teneur en N total est plus faible.

La différence de sensibilité aux entrées entre les différents types d'effluents est due à : la teneur en N total, la teneur en  $N-NH_4^+$  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.

Pour les apports de printemps, la sortie lixiviation ne semble globalement pas très sensible aux entrées : cela peut s'expliquer par le fait que dans la gamme de variation testée, la culture continue à absorber l'azote issu des effluents. Dans la suite de ce travail, il sera donc utile de vérifier le comportement de l'absorption pour des valeurs élevées d'apport d'azote afin de déterminer s'il est utile 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 CIPAN implantée mais génère une importante variation de la lixiviation.

## Démarche et résultats pour l'outil Planilis®

L'analyse de sensibilité de Planilis® a pour objectif d'évaluer la sensibilité de la dose conseillée à des variations de teneur en  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  et  $MgO$  de produits résiduels organiques utilisés pour fertiliser la culture.

### METHODOLOGIE APPLIQUEE A PLANILIS®

L'analyse de sensibilité a consisté à calculer pour chacune des situations de sol et de rotation, le conseil de fumure en  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  et  $MgO$  en faisant varier la teneur du sol (2 valeurs ont été retenues) et en faisant varier la teneur en élément des produits (3 teneurs ont été retenues).

### Choix du critère observé pour juger de la sensibilité de Planilis®

La variable de sortie du calculateur Planilis® est une dose conseillée d'élément fertilisant  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  et  $MgO$  à appliquer sur une culture. Cette dose permet d'alimenter correctement la plante et a pour conséquence de maintenir la teneur du sol à un niveau proche du seuil impasse retenu pour ce type de sol en prenant en compte l'exigence des cultures et la gestion des restitutions des résidus.

Lorsqu'il y a apport de PRO sur une parcelle la dose complémentaire conseillée peut être modifiée sur une, deux, voire trois années compte tenu des règles de report des excédents de fertilisation.

Compte tenu des deux éléments précédents, la variable choisie pour exprimer l'effet d'un apport de PRO est la somme des apports complémentaires conseillés en  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  ou  $MgO$  sur la rotation.

Une étude préalable a montré que cette variable varie linéairement avec la teneur en  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  ou  $MgO$  du PRO lorsque celui-ci est appliqué à une dose donnée et qu'il y a conseil de dose à apporter (Figure 7).

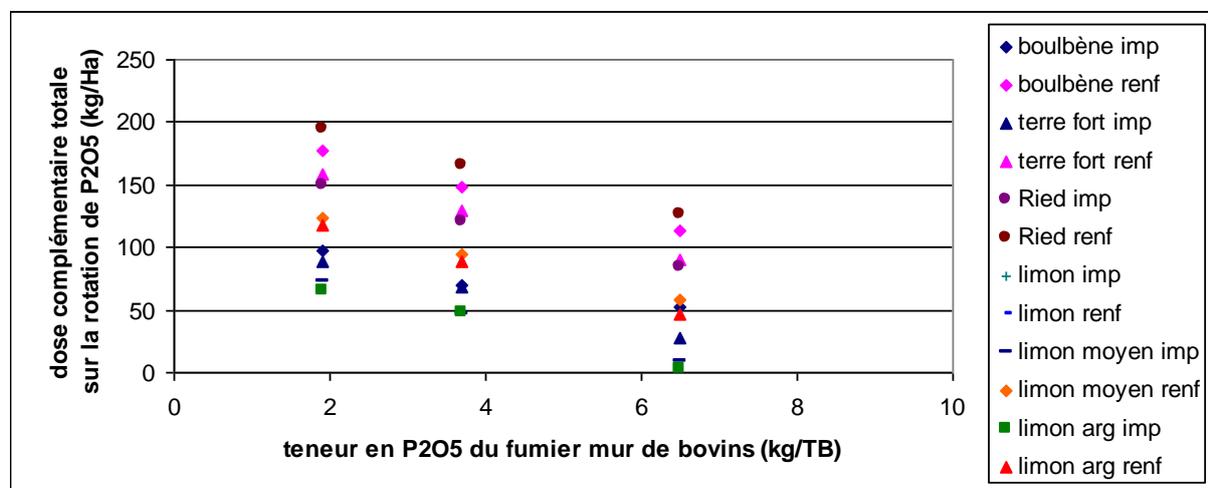


Figure 7 : exemple d'évolution de la dose totale à appliquer sur la rotation dans les différentes situations testées, pour 3 teneurs en  $P_2O_5$  d'un fumier mûr de bovins appliqué à la dose de 20 T/ha en début de rotation.

Le critère choisi pour cette étude de sensibilité est donc la pente de la variation de la dose totale conseillée sur la rotation en fonction de la teneur du PRO en l'élément considéré.

### Interprétation des résultats

Une pente faible (proche de 0) sera interprétée comme une insensibilité de l'outil de calcul à une variation de teneur du PRO en un élément donné.

Une pente positive ou négative sera interprétée comme une sensibilité de l'outil de calcul à la teneur du PRO en un élément donné.

### Choix de la teneur du sol utilisée

Dans l'outil la teneur du sol et son positionnement par rapport aux seuils d'impasse ou de renforcement déterminent le choix d'un coefficient multiplicateur des exportations de la culture. Afin de déterminer la dépendance ou non du critère choisi avec la teneur du sol sans aller dans des teneurs extrêmes (< teneur renforcement très peu fréquents en France ou > teneur impasse pour lesquelles le conseil est le plus souvent l'absence d'apport) le choix s'est porté sur des teneurs proches des seuils impasse et renforcement (légèrement au-dessus du seuil de renforcement et légèrement inférieur au seuil d'impasse).

## Choix des teneurs des produits organiques

L'étude préalable ayant montré que le conseil variait linéairement avec la variation de teneur du produit testé, le choix a été fait d'utiliser les valeurs moyennes et les extrêmes pour les tests (Tableau 16). Ce choix devait permettre d'obtenir au moins 2 valeurs de dose conseillée pour déterminer la pente de variation de la dose en fonction de la teneur du PRO dans un élément donné.

	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			K <sub>2</sub> O			MgO		
	mini	moy	maxi	mini	moy	maxi	mini	moy	maxi
FB jeune	1.9	3.7	6.5	3.8	10.2	20.3	1	2.2	3.5
FB mûr	1.2	3.36	35.9	0.7	7.95	30.8	1.1	2.41	8.2
LP	0.3	2	5.7	0.8	2.5	5.5	0.3	0.6	1.2
FiV	29	33.5	38	20	23	26	5	7	9
FV	10	17	19	11	16	19	3	5	6

Tableau 16 : Teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O et MgO des produits testés en kg/t de produit brut ;

## RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE DE PLANILIS® (détails en annexe 5-AS Planilis.doc)

Les lettres E et f à la fin des noms de situations identifient les teneurs sol proches du seuil de renforcement (f) et proche du seuil d'impasse (E).

Cette partie décrit essentiellement la sensibilité à une variation de teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> du PRO, sachant que les résultats des parties K<sub>2</sub>O et MgO sont seulement résumés ici, mais décrits en annexe 5 « AS Planilis ».

### Résultats pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Les doses complémentaires moyennes conseillées par région, tous produits, sols et teneurs sol confondus sont les suivantes : Aqu = 74 u, Als = 109 u, Pic = 42 u, Bre = 33 u

Les doses complémentaires moyennes conseillées sur la rotation par produit toutes situations confondues sont les suivantes : FB mûr : 89 u, FB jeune = 73 u, LP = 85 u, FiV = 23 u, FV 43 u

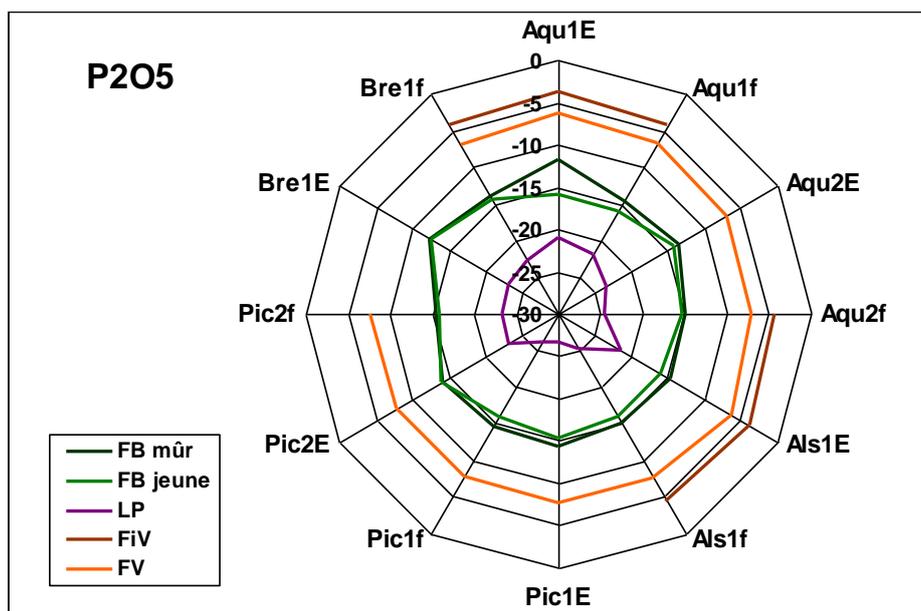


Figure 5 : Variation de la dose complémentaire totale de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> conseillée sur la rotation dans les différentes situations testées en Kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ point de variation de la teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> du PRO.

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 (Figure 8).

Les résultats des calculs de doses conseillées par Planilis® sont peu tributaires de la teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> des fientes et fumier de volailles (5 à 10 kg par point de teneur à rapporter aux 23 et 43 kg/ha à apporter en moyenne par rotation). Les teneurs varient de 9 points pour ces deux produits entre le mini et le maxi observés. Les écarts maxi de doses calculées selon les teneurs vont de 17 à 40 kg/ha selon les situations pour la fiente et de 24 à 60 kg/ha pour le fumier de volailles.

Les résultats sont plus sensibles à des variations de teneurs pour les fumiers de bovins (15 kg par point de teneur pour des apports moyens de 89 et 73 kg /ha). Les teneurs varient de 4,5 points entre le mini et le maxi observés pour le fumier jeune mais de 34,5 points pour le fumier mûr. Les écarts maxi de doses calculées selon les teneurs vont de 20 à 70 kg/ha selon les situations pour le fumier mûr et de 84 à 206 kg/ha pour le fumier jeune.

Les résultats sont très sensibles à la teneur du lisier de porcs (20 à 25 kg par point de teneur pour des apports de 85 kg/ha) les teneurs variant de 5,4 points entre le mini et le maxi observés. Les écarts maxi de doses calculées selon les teneurs vont de 87 à 130 kg/ha selon les situations.

Globalement, le conseil de dose varie plus vite pour les produits à faible teneur que pour les produits à teneur élevée (Figure 9). L'évolution de cette variation du conseil n'est pas linéaire : elle est beaucoup plus rapide pour les faibles teneurs que pour les teneurs élevées.

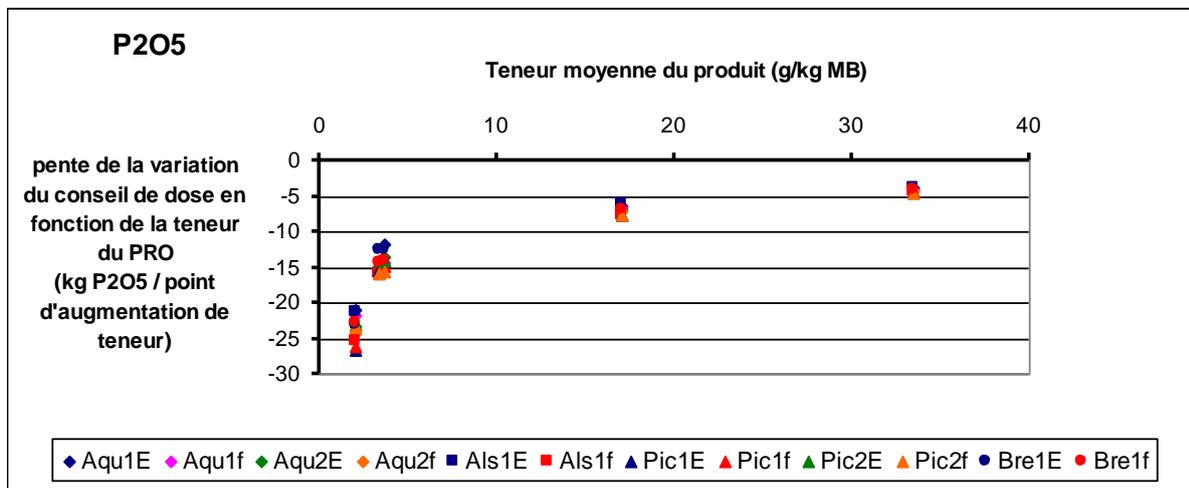


Figure 6 : pente de variation du conseil de dose en fonction de la teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> du PRO.

## Résultats pour K<sub>2</sub>O et MgO des PRO

Les variations de doses conseillées pour K<sub>2</sub>O et MgO 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.

Pour K<sub>2</sub>O, les teneurs des lisiers de porcs devraient être connues avec une plus grande précision que pour les autres produits. Les teneurs des fumiers de bovins sont très variables et doivent être connues avec une meilleure précision car les variations de doses conseillées sont très importantes.

Pour MgO, la teneur du fumier de bovins jeune est très variable et doit être connue avec une meilleure précision car les variations de doses conseillées sont très importantes. Pour les autres produits (fientes, fumier de volailles et lisier de porcs) les écarts maxi de doses conseillées sont relativement faibles par rapport au fumier de bovins. Ils ne nécessitent donc pas le même investissement dans l'amélioration de la connaissance des teneurs en MgO.

## CONCLUSIONS POUR PLANILIS®

Pour le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> les teneurs des lisiers de porcs devraient être connues avec une plus grande précision que pour les autres produits. La teneur du fumier de bovins jeune est très variable et doit être connue avec une meilleure précision car elle entraîne des variations de doses conseillées très importantes. La précision de la teneur pourrait être améliorée par une typologie plus fine des produits concernés

Pour le K<sub>2</sub>O les teneurs des lisiers de porcs devraient être connues avec une plus grande précision que pour les autres produits. Les teneurs des fumiers de bovins sont très variables et doivent être connues avec une meilleure précision car les variations de doses conseillées sont très importantes. L'amélioration de la précision de la teneur pourrait passer par une typologie plus fine des produits concernés

Pour le MgO la teneur du fumier de bovins jeune est très variable et doit être connue avec une meilleure précision car les variations de doses conseillées sont très importantes. L'amélioration de la précision de la teneur

pourrait passer par une typologie plus fine conduisant à un plus grand nombre de catégories de fumiers de bovins. Pour les autres produits (fientes, fumier de volailles et lisier de porcs) les écarts maximaux de doses conseillées sont relativement faibles par rapport au fumier de bovins. Ils ne nécessitent donc pas le même investissement dans l'amélioration de la connaissance des teneurs en MgO.

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.

## Démarche et résultats pour l'outil RégiFert®

### METHODOLOGIE APPLIQUEE A REGIFERT®

RégiFert® est un logiciel d'interprétation des analyses de terre pour la gestion de la matière organique des sols (MOS), la gestion du statut acido-basique (SAB), des éléments nutritifs P-K-Mg et des oligo-éléments B-Cu-Mn-Zn.

Au-delà du diagnostic sur l'état du sol dont est issu l'échantillon analysé, RégiFert® propose généralement une préconisation de fertilisation, prenant en compte les apports organiques prévus.

La version de RégiFert® considérée est la version 3.2 (2007), décrite dans la documentation "Manuel de l'agronome" de 2007 (Denoroy *et al.*, 2007a).

RégiFert® est organisé en modules indépendants :

- deux modules relatifs aux variables d'environnement ("conditions de croissance") de la culture : (1) le module SAB (statut acido-basique) ; (2) le module "C organique", représentant la matière organique du sol ;
- trois modules relatifs à des éléments nutritifs en forte interaction avec la phase solide du sol : P, K, Mg ;
- quatre modules relatifs à des oligo-éléments, dont la carence comme l'excès peuvent poser problème à la croissance des cultures : B, Cu, Mn, Zn.

Le module SAB ne prend pas en compte les effluents organiques.

L'apport d'effluents organiques n'est qu'un critère facultatif (et non implémenté par défaut) dans l'évaluation du risque de carence en certains oligoéléments : l'apport d'effluent organique peut augmenter biodisponibilité d'oligo-éléments (réduction du risque de carence ou augmentation du risque de toxicité).

*Aussi, la présentation résumée qui suit ne porte que sur les modules C, P, K et Mg.*

Le détail des études réalisées dans le cadre de ce volet figure dans le rapport complet en annexe 6, "Analyse de sensibilité de l'outil d'aide à la décision RégiFert®".

Nous avons cherché à évaluer la sensibilité des sorties de RégiFert® aux valeurs des paramètres associés à la description des effluents d'élevage. Pour ceci, on a considéré les mêmes jeux d'hypothèses (contexte pédoclimatique, successions de cultures) que pour l'analyse portant sur les autres outils logiciels. Toutefois, un certain nombre de paramètres (date d'apport, climat...) pris en compte dans les outils dédiés à l'azote n'interviennent pas dans RégiFert®.

On n'aura donc à considérer que les 5 effluents-type définis (fumier de bovins décomposé, fumier de bovins pailleux, lisier de porcs, fumier de volailles, fientes de volailles), avec les paramètres les décrivant (moyenne, extrêmes) et les quantités d'apport (deux cas extrêmes autour d'une dose d'apport moyenne).

**Et comme pour l'outil Planilis®, nous avons estimé les effets de variations des paramètres décrivant l'usage des effluents, sur le calcul de la dose d'engrais minéral à apporter en complément.**

**Nous avons de plus évalué les besoins de précision sur les caractéristiques des effluents pour des hypothèses de précision souhaitée au niveau de la préconisation finale.**

## RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE DE REGIFERT® (cf. annexe 6-AS Regifert.doc)

### *Le module Carbone organique*

Les effluents d'élevage n'interviennent dans ce module que par leur apport de carbone organique (C\_org) qui intègre le calcul du bilan humique :

$$K1mcamend =$$

$$K1mcamend + ISOHUMIQUE(i) \times QUANTITE(i) \times MS(i) \times C(i) \times (1/OCCURENCE\_AMEND(i))$$

Avec :

<b>ISOHUMIQUE(i)</b>	= coefficient isohumique de l'amendement i
<b>QUANTITE(i)</b>	= quantité (T/ha) d'amendement apporté
<b>MS(i)</b>	= teneur en matière sèche de l'amendement
<b>C(i)</b>	= teneur en C de la MS de l'amendement
<b>(1/OCCURENCE_AMEND(i))</b>	= fréquence d'apport (=1/années entre apports)

La formule de calcul de la quantité d'humus produite étant strictement multiplicative, il importe surtout de comparer la variabilité relative des différents paramètres. En effet, les paramètres les plus variables en relatifs sont ceux qui feront le plus varier (relativement) l'estimation de la quantité de C\_org obtenue par humification, donc leur caractérisation est prioritaire.

Les effluents avicoles n'ont pu être traités dans l'étude du module C, faute d'informations suffisantes dans le jeu de données choisi pour l'analyse de sensibilité de tous les outils : pas de valeur de C ou de MO dans le jeu de données partagées, pour ces effluents

Un problème méthodologique tient au fait que les teneurs des produits organiques sont souvent exprimées relativement à la Matière fraîche (MF) alors que RégiFert® détaille la teneur de matière sèche (MS) et la teneur d'élément vis-à-vis de la MS (ici, C/MS).

L'étude des informations disponibles conduit à penser (sans certitude cependant) que la teneur en MS/MF des effluents est un critère majeur de la variation de C/MF. On a trouvé une très forte corrélation entre MS et C commune pour tous les effluents bovins (sauf lisier veau), et une forte corrélation commune pour les effluents porcins non traités.

Il apparaît par contre nécessaire de caractériser davantage la variété des effluents porcins traités, certains l'étant par un fort ajout de C végétal (sciure, etc.).

Dans les divers cas traités (succession culturales × apports d'effluents), le calcul de bilan humique met en évidence la prépondérance des résidus de culture, qui vont représenter de l'ordre de 3 à 10 fois (voire plus) que l'apport d'humus par les effluents. On note que les lisiers et fientes apportent sensiblement moins d'humus que les fumiers : doses plus faibles et coefficients isohumiques plus faibles.

Par conséquent, l'impact d'une variation des paramètres relatifs au C des effluents sur le bilan humique final s'avère dépendant de la valeur absolue de ce bilan. Si le bilan est proche de l'équilibre, l'impact des effluents ressort beaucoup car relatif à un dénominateur proche de 0. Au contraire, si le bilan est très positif ou négatif, une variation de 10 % du bilan humique "effluent" n'impacte que de 1 à 3 % le bilan humique global.

En détaillant les sources de variabilité dans le calcul du bilan humique propres aux effluents, on constate que teneur en MS et coefficient isohumique sont prépondérants. Ce sont donc les deux paramètres sur lesquels les efforts doivent porter. Mais si la teneur en MS peut être facilement mesurée ou évaluée, le coefficient isohumique, difficile à évaluer, devra faire l'objet d'efforts en recherche, en particulier pour chercher à l'estimer en routine à partir de grandeurs biochimiques simples, tel l'ISMO (Lashermes *et al*, 2009).

### *Les Modules Phosphore, Potassium, Magnésium*

Compte-tenu de la similitude des algorithmes des 3 modules P, K et Mg, la procédure d'analyse de la sensibilité des sorties aux variables "effluents d'élevage" est commune aux 3 modules ; elle est présentée ici seulement pour le cas du P.

Les effluents sont considérés pour leur apport en minéraux qui viennent en déduction de la quantité de nutriments (minéraux) apporter aux cultures.

Quantité totale de phosphore apporté par l'amendement **a** :

$$A_a^P = Q_a \cdot TMS_a \cdot T_a^P \cdot 1000$$

Avec :

$A_a^P$  : quantité d'élément P correspondant à l'apport de l'amendement **a** (kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)

$Q_a$  : quantité d'amendement **a** correspondant à un apport (T produit *frais*/ha)

$TMS_a$  : teneur en matière sèche de l'amendement **a**

$T_a^P$  : teneur en P de l'amendement **a** (en kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /kg de produit *sec*).

L'analyse de sensibilité serait à faire sur chacun des paramètres. Toutefois, les formules de calcul étant strictement multiplicative, on se retrouve dans un cas assez proche de celui de C (M.O.S).

De même que pour C, il apparaît que la teneur en MS des effluents (souvent non connue mais nécessaire dans RégiFert®) est probablement un fort déterminant de leur teneur en élément d'intérêt (P, K ou Mg) dans l'effluent brut. En d'autres termes, la variation de teneur en P (resp. K et Mg) / MS serait bien moindre que la variation de MS/MF pour une large famille d'effluents (au moins quand effluents non traités). Cette relative stabilité du taux de nutriment sur la MS semble nette pour P, moins pour K ou Mg.

Il convient d'identifier les cas qui s'éloignent de la relation générale : parmi les effluents bovins, le lisier de veau apparaît toujours comme un cas particulier. Et dans les effluents porcins, les produits dérivés de traitement sont autant de cas particuliers.

Néanmoins une meilleure caractérisation de la teneur en MS des effluents est souhaitable, au sein d'une famille de produit, pour en estimer simplement la qualité fertilisante.

Dans les cas testés (sols peu pourvus initialement), les apports de P par les effluents représentent de 30 à 90 % des besoins des successions (besoins cumulés de fertilisation nécessaires sur 3 ans variant de 221 à 383 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Les taux de couverture les plus élevés des besoins correspondant aux fumiers et lisiers de volaille.

Teneur et dose (effluent brut) ayant été étudiées, il apparaît que la teneur est le critère le plus sensible dans le cas des produits peu concentrés, la dose étant plus sensible dans le cas des produits concentrés en P (lisier et fumier de volaille). Un exemple illustre ce résultat (Tableau 17).

Produit	sensibilité à la teneur en P : $\Delta$ kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> minéral / $\Delta$ kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /Teffluent brut	sensibilité à la dose : $\Delta$ kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> minéral / $\Delta$ T apport effluent brut
fumier bovin mûr	-20	-3.7
fumier bovin jeune	-20	-3.4
lisier porc	-30	-2.0
fiente volaille	-6	-33.5
fumier volaille	-9	-17.0

**Tableau 17** : Synthèse de la sensibilité de la dose d'engrais minéral P nécessaire, par unité de variation de teneur P ou de dose d'apport d'effluent.

Une unité de variation sur la teneur ayant relativement plus d'impact sur le calcul de bilan de nutriments dans le cas d'un produit de teneur faible, c'est donc sur ces produits que la caractérisation devra être la plus précise.

Pour K, les flux cumulés de fertilisation nécessaires sur 3 ans varient de 302 à 603 kg K<sub>2</sub>O les apports par les effluents couvrent de 12 à 66 % des besoins de la rotation.

Les flux cumulés de fertilisation magnésienne nécessaires sur 3 ans varient de 43 à 135 kg MgO, couverts de 13 à 116 % par les apports relatifs aux hypothèses d'apports organiques.

Comme pour P, la teneur est un critère le plus sensible que la dose apportée dans le cas des produits peu concentrés en K ou Mg, la situation étant inverse dans le cas des produits concentrés (lisier et fumier de volaille).

Par ailleurs, faisant des hypothèses sur le niveau de précision souhaité dans l'estimation des doses de fertilisation on peut estimer le niveau d'incertitude admissible sur les paramètres caractérisant les effluents (MS/MF, élément / MS). Par construction, l'incertitude admissible sur la teneur en éléments sur matière brute de l'effluent (ou sur le produit "teneur/MS × MS/MF" qui détermine l'apport en nutriment par tonne épandue) sera inversement proportionnelle à la quantité d'élément apportée par l'effluent.

Ainsi, pour une imprécision acceptable de 5 unités P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O ou MgO pour la préconisation sur les 3 ans de la succession, l'incertitude admissible sur la teneur sur brut, pour des doses et teneur moyennes, serait de 3 à 8 % pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 2 à 7 % pour K<sub>2</sub>O, 10 à 28 % pour MgO.

## **CONCLUSION POUR L'OUTIL REGIFERT®**

Des études menées sur la base de RégiFert®, on peut retenir :

- 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, du fait de la corrélation entre la teneur en ces éléments et la teneur en MS des effluents ;
- les coefficients isohumiques ont encore à être précisés ;
- les efforts de caractérisation des taux de nutriment (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.

Même si de nouveaux outils d'interprétation des analyses de terre viennent à remplacer RégiFert® dans les années futures, les conclusions présentées ici devraient probablement rester valides car il y aura sans doute peu de modification dans la façon dont seront considérés des effluents d'élevage, de RégiFert® à ses successeurs.

## **Discussion et conclusion générale**

Il est difficile de résumer et conclure sur les résultats à propos des 4 outils puisque comme on l'a vu, leurs objectifs et leurs fonctionnements diffèrent. Les outils les plus proches que sont Planilis® et RégiFert® ont tout de même une conclusion en commun : 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 ce qui concerne la démarche, ce volet a permis de mieux connaître les outils et leur sensibilité à certains facteurs. En termes d'objectifs initiaux, le travail n'a été que partiellement réalisé puisque nous envisageons au départ d'étudier l'ensemble des effluents paramétrés dans chaque outil, afin de discuter les typologies d'effluents pour les outils et notamment de mieux allouer les produits dans les différents types. Cela n'a pas pu être mis en œuvre car le temps nécessaire à la mise en œuvre d'une telle analyse a été largement sous-estimé, et nous nous sommes par conséquent focalisés sur 5 types d'effluents très répandus. Cela explique également pourquoi nous n'avons pas pu élaborer un cahier des charges formel pour améliorer la typologie des effluents d'élevage nécessaire à chaque outil comme cela était prévu dans la phase 2 de ce volet 1.

En revanche, des enseignements ont été tirés pour une meilleure prise en compte des effluents dans les outils, et font l'objet d'une partie du sous-volet 4.1.

En termes de résultats « indirects » importants, cette étude a permis de mieux connaître le fonctionnement de l'outil Syst'N®, qui est actuellement en cours de construction. A ce titre, la quantité importante d'azote absorbé devra être étudiée de façon plus approfondie et pourrait donner lieu à une modification du module « absorption d'azote par les cultures » car l'absorption semble trop élevée dans les cas de présence d'azote minéral dans le sol très importante.

○ **indicateurs de suivi**

Agents	Tâches réalisées	2010	2011	2012-2013	Total
<b>INRA</b>					<b>12,63</b>
V Parnaudeau (IE1)	Fiche et AS Syst'N®	1,00	2,00	2,50	5,50
P Denoroy (IR1)	Fiche et AS RégiFert®	0,69	1,36	1,38	3,43
J-M Machet (IR)	Fiche et AS AzoFert®	0,70	1,80	1,20	3,70
<b>LDAR</b>					<b>5,32</b>
N Damay (ingénieur)	Fiche et AS AzoFert®	1,20	0,79	0,26	2,25
C Le Roux (ingénieur)		0,60	0,64	0,50	1,74
J Gaillard (ingénieur)		-	-	1,33	1,33
<b>Arvalis</b>					<b>2,53</b>
R. Trochard (ingénieur)	Fiches descriptives AzoLis®, PlaniLIS® et analyse sensibilité				1,94
A. Bouthier (ingénieur)					0,34
C. Le Souder (ingénieur)					0,25
<b>ITAVI</b>					<b>0,30</b>
C Aubert (ingénieur)	Fourniture de données	0,24	0,06	0	0,30
<b>Institut de l'élevage</b>					<b>0,985</b>
A. Charpiot (ingénieur)	Fourniture de données	0,75	0,15	0,01	0,91
E. Lorinquer (ingénieur)	Fourniture de données	-	-	0,075	0,075
<b>IFIP</b>					<b>0,10</b>
P. Levasseur (ingénieur)	Fourniture de données	0,10	-	-	0,10
<b>TOTAL</b>					<b>21,865</b>

**Tableau 18** : Participation indicative des partenaires au sous-volet 1 (en mois).

Le travail sur le volet 1 a donné lieu à 11 réunions de travail (dont 5 en visio-conférence en 2011, les autres physiques ou téléphoniques).

## III.2. Volet 2.1

### ○ **rappel des objectifs attendus**

De nouveaux outils de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des impacts environnementaux ont été développés notamment dans le cadre du RMT « Fertilisation et Environnement » (AzoFert®, RégiFert®, Syst'N®). Ils sont basés sur une modélisation dynamique des transformations des matières organiques apportées aux sols, à partir d'un certain nombre de produits organiques types. Toutefois, la diversité de composition des effluents d'élevage n'est pas suffisamment prise en compte.

Par ailleurs, les références françaises concernant la caractérisation des effluents d'élevage, sont plus ou moins récentes et précises. Avec l'évolution des bâtiments suite à la mise aux normes, des itinéraires techniques et des gammes alimentaires utilisées, les références issues de la brochure « Fertiliser avec les engrais de ferme » (Institut de l'Élevage, ITAVI, ITCF, ITP, 2001), nécessitaient d'être mises à jour et enrichies.

Enfin, la fertilisation des cultures avec un fumier ou un lisier de porc, de volailles ou de bovin nécessite de bien connaître leur composition. A ce titre, pour les porcs, il est possible de s'appuyer sur des références comme celles proposées par l'IFIP (Composition des effluents porcins, ITP 2005). Compte tenu de la spécificité de chaque élevage, il est préférable de disposer de ses propres références. L'analyse chimique de laboratoire se heurte toutefois à la question délicate du prélèvement d'échantillons, a fortiori dans le cas de produits très hétérogènes, et les résultats sont parfois bien loin de la réalité. Pour s'affranchir de ces difficultés, il est nécessaire de s'investir aujourd'hui dans la mise au point de méthodes de prédiction alternatives de la composition des effluents.

L'objectif de ce volet est de construire (sous Excel) et de valider un outil de simulation de la composition des effluents porcins, bovins et avicoles destinés à l'épandage. Ce calculateur pourrait permettre, à terme, de remplacer les coûteuses analyses de laboratoire.

### ○ **méthodes de travail utilisées**

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 logements, etc.). Cet outil permet de s'affranchir des analyses de déjections dont la variabilité importante, due notamment aux difficultés d'échantillonnage, a été démontrée par plusieurs études.

Pour la partie « porc » du calculateur, un cahier des charges d'une quarantaine de pages a été réalisé, en 2010, à partir de la bibliographie (p.ex. Institut de l'élevage *et al.*, 2001 ; Corpen, 2003 ; Levasseur, 2005 ; IPCC, 2006 ; Rigolot *et al.*, 2010 ; CORINAIR). Sur l'ensemble des informations disponibles, il a fallu faire un arbitrage sur le choix des facteurs de variation, des références et des équations.

Un **guide méthodologique** expliquant le choix des références et équations finalement retenus a également été élaboré (cf. annexe 7). 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.

Outre ce guide méthodologique, ce calculateur est également accompagné d'une **notice d'emploi** qui doit en permettre un usage aisé même en l'absence de formation spécifique.

### **Elaboration du calculateur**

En 2011, une première version Excel de ce calculateur a été élaborée. Elle n'a cessé d'évoluer au cours de ce projet. A ce titre, pratiquement l'ensemble des éléments prévisionnels du projet initial ont été respectés, c'est-à-dire que ce calculateur permet de simuler la quantité d'effluent produit par catégorie d'animal (en m<sup>3</sup>/an pour les liquides, en t/an pour les solides) et sa composition en Matière Sèche (MS), Matière Organique (MO), Carbone (C), azote (N), phosphore (P), potassium (K), cuivre (Cu) et zinc (Zn).

## Validation du calculateur

La comparaison des résultats entre calculateur et analyse de laboratoire est délicate car se pose systématiquement la question de la méthode témoin. Même avec toutes les précautions, la réalisation d'échantillons représentatifs en élevage de production est difficilement envisageable. En effet, l'homogénéisation doit être satisfaisante à tous les stades de la prise d'échantillon (élevage, laboratoire) pour que les quelques centilitres effectivement analysés soit représentatif de plusieurs centaines voire milliers de m<sup>3</sup> de lisier, ce qui est rarement le cas en élevage porcin (Levasseur *et al.*, 2007). Pour les fumiers, la difficulté n'en est *a priori* pas moins grande compte tenu de l'hétérogénéité naturelle des litières.

A ce jour, les différences observées entre des valeurs de rejets calculés (nécessaire au dimensionnement des plans d'épandage) et des valeurs mesurées *in situ* (pratiqués par les éleveurs pour la fertilisation des cultures et le transfert d'effluent vers les prêteurs de terre) constituent toujours l'objet de discorde.

Ainsi, pour un certain nombre d'éléments, la détermination des rejets dans le calculateur s'est fait sur la base du bilan matière entre ce qui rentre et ce qui sort de l'exploitation (voir notice d'emploi du calculateur). La fiabilité de ce bilan de masse est vraisemblablement très bonne pour le phosphore, le cuivre et le zinc car d'une part il s'agit d'éléments non volatils, d'autre part leurs teneurs corporelles et dans les aliments sont parfaitement connues. Les flux de potassium sont un peu moins bien maîtrisés car cet élément ne constitue pas une contrainte de formulation, la teneur des aliments en potassium est donc rarement connue. Par contre, il s'analyse aisément, tant dans l'aliment que dans les effluents (sa solubilité fait qu'il ne sédimente pas). Pour l'azote, la volatilisation est relativement variable alors que les références de rejets sont basées sur des coefficients de volatilisation fixes. Dans le calculateur, les pertes d'azote par volatilisation ont été adaptées aux stades physiologiques, à la présence d'une couverture ou non, à la durée du compostage et à la période d'épandage (voir guide méthodologique pour plus de précision).

Si les rejets en N, P, K, Cu et Zn nous semblent satisfaisants (aux nuances près évoquées précédemment), il nous a semblé opportun de refaire un point sur les quantités d'effluents produites par les élevages de porcs. Une enquête téléphonique a donc été menée auprès de 170 élevages porcins. Les résultats ont été croisés avec la bibliographie afin de déterminer les volumes de lisier produit par stade physiologique. Les résultats ont été intégrés dans le calculateur. Des élevages sur litière ont également été enquêtés mais il ne nous a pas été permis de les exploiter compte tenu d'une trop forte variabilité des résultats.

A l'inverse des éléments vus précédemment, il n'existe pas de références de rejets pour la matière sèche (MS), la matière organique (MO) et le carbone (C). Pour les lisiers de porcs, nous nous sommes basés sur les facteurs d'émission IPCC (2006). Pour les fumiers et composts de porcs, nous avons repris les teneurs moyennes de la brochure de Levasseur (2005).

Pour la partie bovins, les compositions alimentaires ont été comparées aux compositions alimentaires du « Guide pratique : Alimentation des bovins, ovins et caprins » (2007).

### ○ organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés

Ce sous-volet a été coordonné par l'IFIP et l'Institut de l'Élevage, en partenariat avec l'ITAVI. L'équipe projet de ce sous volet était composée de Pascal Levasseur (IFIP), Alicia Charpiot (Institut de l'Élevage), Claude Aubert (ITAVI) et associait le pôle de recherche des Chambres d'Agriculture de Bretagne.

Il était prévu le recrutement d'un stagiaire pour chacune des deux premières phases mais aucun candidat ne s'est présenté ; aussi, ces tâches ont été réalisées par les chefs de projets identifiés dans le projet.

Lors de la réalisation de la partie « Porcs » du calculateur, les références disponibles pour les volumes/masses d'effluents porcins produits sont apparues fragiles et il s'est avéré nécessaire de les réactualiser. Une enquête téléphonique a donc été menée auprès de 170 élevages de porcs essentiellement naisseur-engraisseurs mais aussi post-sevreux engraisseurs et engraisseurs purs. Un étudiant en BTS agricole (Vincent Dandin, Lycée agricole « Le Robillard » à Saint Pierre sur Dives) a été recruté à cet effet pour la période de juin et juillet 2012.

Les résultats montrent qu'il existe une forte variabilité des niveaux de production avec un coefficient de variation autour de la moyenne de 16 %. Cela signifie que pour un élevage de 180 truies en naisseur engraisseur, 68 % des élevages aura une production comprise entre 2 915 et 4 025 m<sup>3</sup>/an. Des écarts à la moyenne extrêmes de -35 à +50 % ont même été observés. Cette enquête, associée à la bibliographie nous a également permis de

déterminer que la production de lisier est en moyenne de 480 l par porc charcutier produit, 90 l par porcelet produit et 6,2 m<sup>3</sup> par truie présente et par an. Ainsi, pour un élevage naisseur engraisseur, plus de la moitié du lisier (57 %) provient de l'engraissement, un tiers des truies et 11 % des post-sevrages. Sur ces bases, un élevage de 180 truies naisseur-engraisseurs total produit annuellement 3 469 m<sup>3</sup> de lisier, soit seulement 2 % de moins que les normes de stockage (3 533 m<sup>3</sup>).

Les techniques d'alimentation et d'abreuvement constituent un important facteur de variation du taux de dilution du lisier via essentiellement le gaspillage d'eau. Sur cet échantillon d'élevage, les deux tiers des porcs charcutiers sont alimentés avec un système d'alimentation en soupe, essentiellement sans repas d'eau supplémentaire (49 %), ce qui constitue une technique économe en eau, notamment pour des taux de dilution peu élevés. La proportion de truies alimentée en soupe est relativement similaire (68 %), mais elles sont 44 % à recevoir un repas d'eau (24 % sans repas d'eau). En post-sevrage, l'alimentation est sèche dans 90 % des cas. L'utilisation de récupérateur d'eau n'est pas négligeable, l'alimentation sèche + abreuvoir avec récupérateur d'eau représentant 28 % de la totalité des situations. A noter que lorsque les porcs disposent d'abreuvoir, les éleveurs les estiment très majoritairement bien réglés, signe que le gaspillage d'eau constitue une réelle préoccupation. L'analyse des données n'a pas pu démontrer un effet significatif du mode d'abreuvement sur la production de lisier compte tenu, vraisemblablement, d'un effectif d'élevage enquêté insuffisant au regard de la variabilité des données.

Notre effectif d'élevage n'était pas assez élevé pour déterminer les masses de fumier et compost obtenues par catégorie d'animal, nous avons donc retenu, dans le calculateur, les références bibliographiques. L'absence de références pour les truies, nous a conduits à nous appuyer sur les normes de stockage.

L'action de validation s'est poursuivie par une comparaison des valeurs de concentration calculées et des valeurs d'analyses de la brochure de Levasseur (2005) comprenant plusieurs centaines de données. En résumé (le détail de l'analyse et de l'argumentaire figure dans le guide méthodologique), cette comparaison montre :

- Que les valeurs calculées sont plus élevées que les valeurs d'analyse pour les lisiers, quels que soient les macroéléments. Nous retenons l'hypothèse d'une sous-évaluation générale de l'ensemble des valeurs d'analyse compte tenu (1) de la robustesse du modèle et des références retenues, (2) de la difficulté pour obtenir un échantillon représentatif des lisiers.
- Une bonne concordance entre ces deux méthodes d'estimation pour les fumiers
- Que les teneurs calculées pour les composts sont inférieures aux valeurs d'analyse. Il est possible que la perte de poids des fumiers au compostage, soit sous-estimé par rapport à l'ensemble des essais menés par ailleurs (sur lesquels nous disposons des valeurs d'analyse mais pas de bilan matière).

Ces comparaisons ont été menés pour des lisiers ou des fumiers standards, c'est-à-dire pour des modèles d'élevages ou d'animaux les plus représentatifs. Il ne nous a pas été possible d'effectuer des comparaisons (entre valeur calculée et mesurée *in situ*) pour l'ensemble des facteurs de variation retenue dans le calculateur car soit il n'y avait pas de références disponibles (exemple : effet de la zone géographique/pluviométrie), soit par manque de références autres que celles ayant permis de fournir les équations, soit parce que nous n'avions pas de certitude que « toutes choses étaient égales par ailleurs » (difficulté d'attribution des différences observées).

Ainsi pour la filière porcine, l'IFIP a intégré le modèle du Bilan Réel Simplifié (CORPEN 2003). Ce calculateur permet de déterminer les rejets en azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc par un élevage de porcs. Parallèlement, il a fallu concevoir et intégrer les modules de calcul des rejets en matière sèche, matière organique et carbone, de même que les volumes ou masses d'effluents produits.

Pour la filière volailles, un travail de fond a également été réalisé pour réévaluer les rejets de N, P, K, Cu et Zn des différentes espèces de volailles en fonction de leurs itinéraires techniques, des performances zootechniques et des gammes alimentaires utilisées. Les valeurs obtenues sont utilisées dans les séquences de calcul de COMPOSIM.

### ○ étapes et calendrier

Le travail s'est déroulé en trois phases successives :

- La première étape a consisté à effectuer un inventaire des données existantes. Cela s'est essentiellement déroulé la première année du projet mais s'est poursuivi, de manière plus ponctuelle, au cours des années 2 et 3.

- La seconde phase, plus opérationnelle, a consisté à construire le calculateur COMPOSIM. Il s'est déroulé sur les années 2 et 3. Le calculateur a été conçu en y intégrant des modules existants (rejets en azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc par un élevage de porcs, de bovin ou de volailles) et en en développant d'autres (matière sèche, matière organique et carbone, volumes ou masses d'effluents produits).
- La troisième et dernière tâche du volet 2.1, qui consistait à valider le calculateur, s'est déroulée au cours de la dernière année du projet.

o **résultats obtenus**

« Composim », le calculateur de la quantité et de la composition des effluents d'élevage de porc, bovin et volaille, 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 (exprimé en équivalent P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et le potassium (exprimé en équivalent K<sub>2</sub>O). 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 (en % du produit brut ou en g/kg de produit brut ou en mg/kg de matière sèche selon les éléments). Les quantités d'effluent produites sont exprimées en t/an pour les solides (fumier, compost) et en m<sup>3</sup>/an pour les liquides (lisier). La période annuelle est prise par défaut mais il est possible de faire des simulations sur des périodes plus ou moins longues.

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 10), qui reprend les éléments sur le nombre et le type d'animaux, le mode de logement, la quantité de litière apportée, la couverture des ouvrages de stockage et la localisation de l'exploitation ; et (ii) la page des résultats (Figure 11), qui présente par filière une estimation des quantités et de la composition des différents effluents.

Figure 10 : Composim, page commune de saisie.

Filière/atelier	Ouvrages de destination	Intitulés produits	Quantité annuelle produits bruts	Unités	Quantité d'éléments transisant annuellement dans l'ouvrage de stockage							Concentration des effluents sur la période considérée										
					MS	MO	C	N total	N amm	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Cu	Zn	MS	MO	C	NTK	N amm	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Cu	Zn
					kg/an							g/kg produit brut										
Bovins	Liquides (fosse 1)	Liquides (lisier, purin, eaux vertes, eaux blanches, eaux	2340	m <sup>3</sup> /an	161	114	57	5113	-	2637	7565	-	-	6,9	4,9	2,4	2,2	0,0	1,2	3,2	-	-
	Solide (fumière et bout de cham)	Fumier	120	t/an	27	19	10	444	-	281	732	-	-	22,1	16,2	8,1	3,7	0,0	2,3	6,1	-	-
Porcins	Fosse 1	Lister/purin	3680	m <sup>3</sup> /an	183	133	66	16775	11369	9848	11006	50	140	5,0	3,6	1,8	4,6	3,1	2,7	3,0	273	763
	Fosse 2	Lister/purin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fumière	Fumier frais paille	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Compost paille	Fumier frais sciure	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volailles	Fumière (fumier paille frais)	Compost sciure	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 11 : Composim, onglet « Résultats ».

Des précisions complémentaires sur les caractéristiques d'élevage sont demandées pour les porcs, les bovins et les volailles *via* des onglets de saisie spécifiques (cf. ci-dessous les spécificités de chacune des trois filières animales).

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 des OAD, pour mettre en évidence des paramètres d'élevage pour lesquelles 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.

- **Spécificités de la partie « Porcs »**

De façon résumée pour les porcs, les facteurs pris en compte sont les suivants :

- Catégorie d'animal (troupe présente, porc charcutier produit, porcelet produit)
  - Effectif (2 options de saisie : de façon simplifiée ou détaillée pour des situations précises d'élevage)
  - Type d'effluent produit (lisier, fumier paille/sciure, compost paille/sciure)
  - Zone géographique en lien avec la pluviométrie (26 villes de la métropole française)
  - Période d'épandage (fin d'hiver, fin d'été ou moyenne annuelle)
  - Couverture (ou non) de la fosse de stockage
- Spécifiquement pour les lisiers
    - Type d'alimentation ou d'abreuvement
    - Intensité du lavage des bâtiments
  - Spécifiquement pour les fumiers
    - Conduite de la litière
    - Durée éventuelle du compostage
    - Méthode de détermination des rejets (méthode simplifiée : alimentation standard/biphase ou méthode détaillée dite du « Bilan Réel Simplifié »)

Pour la partie « porc », il y a en outre 2 niveaux de complexité de la saisie au choix *via* d'une part les effectifs animaux et d'autre part les quantités /compositions des aliments consommés par les porcs. L'approche simplifiée ne nécessite pas de connaissances fines de l'élevage porcin, les volumes et composition des effluents sont suffisamment précis pour les principales catégories d'élevage. Pour avoir des informations plus précises sur un élevage donné, les rubriques « effectifs détaillés » et « aliments » doivent faire l'objet d'une saisie spécifique. Ces informations sont aisément disponibles si l'élevage dispose d'une Gestion Technico-Economique.

Ces 2 niveaux de saisie permettent ainsi d'élargir le public des utilisateurs potentiels, du conseiller généraliste en environnement jusqu'au spécialiste en production porcine, en passant par l'éleveur de porc.

- **Spécificités de la partie « Volailles »**

En production avicole, le type de déjections au sein d'une même espèce animale est relativement standardisé (taux de matière sèche, quantité totale produite,...). Cependant, des différences de compositions apparaissent pour certains modes de production (standard, label, biologique), principalement causées par le type de souche génétique et les formules alimentaires, mais également à certaines pratiques d'élevage (durée d'élevage, gestion des litières...).

En aviculture, deux types de déjections sont présentes :

- des déjections solides (fientes ou fumier en production de poules pondeuses, fumier en volaille de chair)
- des déjections liquides (lisier en production de canard à rôtir et en palmipède gras).

Ainsi, pour une approche simple mais précise, le calculateur prévoit la saisie

- des différentes espèces produites (poulet, dinde, pintade, canard et pondeuses)
- des modes de production (standard, label, biologique)
- des effectifs annuels (renseignements de manière simplifiée).

Du fait de nombreuses pratiques de stockage des effluents dans ces productions, il est également possible de préciser dès le premier onglet :

- le type d'ouvrage de stockage (fumière, stockage en bout de champ pour les fumiers, hangar de stockage pour les fientes, fosses à lisier)
- le type de litière utilisée (paille ou copeaux de bois)
- le traitement éventuel des effluents avicoles (compostage ou non).

Il est nécessaire de remplir l'onglet « Descriptif d'élevage » pour obtenir davantage de précisions sur les caractéristiques de l'élevage et les effectifs (surface de bâtiment, nombre de lots pratiqués dans l'année, durée d'élevage, nombre d'animaux, poids finaux, ...), mais également sur les pratiques de l'élevage (détassage en cours de bande, sexage,...). Ce descriptif de l'élevage permet d'avoir une analyse précise lors de la réalisation du bilan de masse qui sert de base à l'estimation de l'excrétion des volailles. Au sein de cet onglet, d'autres éléments relatifs à la qualité et la quantité de la litière utilisée en élevage sont demandés.

Il est également possible de renseigner directement la quantité de déjections produite par an, si celle-ci est connue (par pesée si possible). Si cette quantité n'est pas connue précisément, il est possible de laisser cette cellule vide. Le calculateur procède à l'estimation de cette quantité à partir d'un bilan  $P_2O_5$  (bilan de masse sur le phosphore) et des références disponibles.

Dans l'onglet « Alimentation », la composition de l'aliment (% MS, N, P, K) par phases (démarrage, croissance, finition, abattage,...) est demandée, ainsi que les quantités d'ingérées et d'eau consommée pour l'abreuvement.

Dans l'onglet « Calcul de l'excrétion », aucune cellule n'est à remplir. La somme des intrants et des sortants est indiquée et permet le calcul de l'excrétion sur les éléments suivants : MS, C, N, P, K.

Ensuite, à partir des niveaux de volatilisation disponibles dans la bibliographie et mesurés sur le terrain, la composition d'un effluent composté ou non est calculée à la sortie du bâtiment et en fin de stockage. Les résultats s'affichent dans l'onglet « Résultats communs ».

Pour chaque filière animale, il y est mentionné l'ouvrage de destination (fosses et fumières) et l'intitulé des produits (lisier, purin, fumier, compost).

- **Spécificités de la partie « Bovins »**

Dans l'onglet « Saisie 2\_bovins », il s'agit de préciser les pratiques d'alimentation et le temps de présence des animaux en bâtiment, afin d'affiner les quantités globales de déjections excrétées au bâtiment ainsi que les quantités d'éléments (N, P, K) rejetés par les animaux, à partir du type de rationnement.

#### Vaches laitières

Afin de déterminer les quantités d'éléments (N, P, K) fixés dans le lait, il est nécessaire de connaître assez précisément la production moyenne annuelle de lait (en kg) par vache, ainsi que la qualité moyenne sur l'élevage du lait produit (le taux protéique (TP) moyen et le taux butyrique (TB) moyen) et enfin le poids vif moyen des vaches laitières.

Le temps passé en bâtiment permet de prendre en compte la part de déjections émise au pâturage ; il est exprimé en nombre d'heure de présence par jour au bâtiment, pour chaque mois considéré. La traite des animaux est à considérer dans le temps de présence au bâtiment.

Trois catégories de fourrages, majoritairement utilisées pour l'alimentation des vaches laitières, sont fixées dans l'outil ainsi que deux types de concentrés. Pour les fourrages, il s'agit de l'herbe pâturée, l'herbe conservée (foin, enrubannage et ensilage d'herbe) et l'ensilage de maïs. Pour le maïs, il s'agit des concentrés azotés et énergétiques. Pour chacun des fourrages de la ration, de même que pour les concentrés, il est nécessaire de renseigner pour chaque mois la quantité en kilogramme de matière sèche ingérée par les animaux.

Ces éléments permettront la pondération du calcul des quantités de déjections produites et la quantification des éléments présents dans les déjections.

#### Autres catégories bovines

Pour les autres catégories et afin de simplifier la saisie des données pour l'alimentation, il est demandé de choisir le principal fourrage distribué aux animaux au cours de chaque mois de l'année. Il s'agit d'une liste déroulante reprenant 4 types de fourrages : l'ensilage de maïs, l'ensilage d'herbe/enrubannage, le foin et l'herbe pâturée.

En complément, il est demandé de préciser le nombre moyen par mois de jours de présence des animaux en bâtiment, afin de déterminer la part de déjections émises au pâturage et celles émises en bâtiment. Pour ces

catégories animales, on considère que lorsque les animaux sont dehors, ils le sont 100 % du temps (contrairement aux vaches laitières où l'on soustrait le temps de traite).

Le poids vif moyen est également demandé pour chacune des catégories animales.

#### Aires de stockage

Des éléments complémentaires sont demandés afin de quantifier au mieux les quantités d'eau de dilution à prendre en compte. Pour se faire, il est nécessaire d'avoir les surfaces (aires de vies découvertes, fosses, fumières) couvertes et non couvertes ainsi que la pluviométrie moyenne (récupérée dans l'onglet commun à partir de la ville la plus proche de l'exploitation) ; ceci permet de déterminer les volumes d'eau de pluie diluant les différents types d'effluents animaux produits.

#### Eaux vertes et blanches

Les quantités d'eaux blanches et d'eaux vertes produites sont calculées de façon automatique à partir de références mentionnées dans la « circulaire 2001 relative à la capacité de stockage des effluents d'élevage et à l'application de la réglementation des installations classées relatives aux élevages ». Elles tiennent compte du nombre de vaches laitières présentes sur l'exploitation.

#### ○ indicateurs de suivi

Agents	Tâches réalisées	2010	2011	2012	2013	Total
<b>IFIP</b>						<b>8,85</b>
P. Levasseur (ingénieur)	Partie Porcs	0,75	1,5	1,1	3,5	6,85
Etudiant en BTS agricole	Enquête agriculteurs	-	-	2	-	2
<b>Institut de l'élevage</b>						<b>1,53</b>
A. Charpiot (ingénieur)	Partie Bovins	0,325	0,575	0,50	-	1,400
E. Lorinquer (ingénieur)		-	-	-	0,125	0,125
J-L. Ménard (ingénieur)		0,005	-	-	-	0,005
<b>ITAVI</b>						<b>1,58</b>
C Aubert (ingénieur)	Partie Volailles	0,18	0,24	0,97	0,18	1,58
<b>TOTAL</b>						<b>11,96</b>

**Tableau 19** : Participation indicative des partenaires au sous-volet 2.1 (en mois).

Le travail sur le volet 2.1 a donné lieu à 3 réunions physiques et de nombreux échanges téléphoniques ou par messagerie électronique.

#### ○ indicateurs de réalisation

Les principaux indicateurs de réalisation ce volet 2.1 sont les trois livrables suivants :

- le calculateur « Composim »,
- sa notice d'emploi,
- son guide méthodologique où sont répertoriés l'ensemble des équations et références retenues.

### III.3. Volet 2.2

#### ○ **rappel des objectifs attendus**

Le sous-volet 2.2 visait à améliorer la capacité des professionnels à déterminer l'épandabilité des effluents. Dans la pratique, la dose effectivement apportée après épandage d'effluents d'élevage au champ est souvent éloignée de la dose visée, ce qui nécessite notamment de s'interroger sur la capacité des effluents à être bien épandus. Les professionnels ont besoin (i) de pouvoir prédire la capacité des effluents à l'épandage et (ii) d'informations sur l'épandage des nouveaux effluents arrivant sur le marché, à l'issue de la mise en œuvre de pratiques nouvelles.

Le sous-volet 2.2 de ce projet était dédié à l'épandabilité des effluents et plus particulièrement à l'amélioration de la capacité à déterminer l'épandabilité des effluents, y compris concernant les nouveaux produits issus de nouveaux procédés de traitement.

Deux points préliminaires majeurs avaient été établis comme postulats de base au projet : (i) tout d'abord, il n'est pas possible de prédire le comportement d'un effluent à l'épandage à partir de sa composition (considération d'autant plus importante qu'une partie du projet se focalise sur la composition des effluents) ; (ii) d'autre part, en l'état actuel des connaissances et des moyens, être capable de « prédire » l'épandabilité des effluents est une tâche particulièrement complexe et non réalisable dans le seul cadre de ce projet.

Ainsi, les actions menées dans le cadre de ce sous-volet se sont contentées de réaliser une première avancée dans le domaine de la caractérisation de l'épandabilité, (i) en élaborant une « grille d'évaluation des effluents » qui permette de décrire un produit de façon compréhensible et significative pour tous et (ii) en menant une étude bibliographique, destinée à faire un état des lieux de l'épandage en France et sur la caractérisation des effluents d'élevage.

#### ○ **méthodes de travail utilisées**

Un **atelier de travail** a été organisé pendant une journée sur le site d'Irstea (ex-Cemagref), à Montoldre (Allier). Il a réuni 16 professionnels du domaine de l'épandage, chercheurs, techniciens, exploitants, agronomes, mécaniciens, constructeurs, entrepreneurs, etc. autour des questions de caractérisation et d'épandabilité des effluents d'élevage.

Cette journée s'est déroulée en trois temps :

- un débat sur la notion d'épandabilité
- des groupes de travail sur la description des effluents
- un exercice de description d'échantillons et d'analyse de leur comportement à l'épandage.

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.

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.

Initialement, un travail **d'expertise en lien avec le terrain** était prévu pour analyser des situations à problème, *via* des échanges avec les professionnels et des expérimentations potentielles à réaliser au banc d'essais. Aucune demande spécifique n'ayant été formulée par les acteurs de terrain au cours du projet, aucune expertise de ce type n'a finalement été réalisée. D'autre part, les essais, tels qu'initialement prévus sur la base de seulement 2 semaines d'essais, ne semblent plus pertinents. En effet, ils n'offraient la possibilité que de tester une seule machine et un travail complet n'était pas réalisable. Les résultats obtenus auraient été difficiles à raccorder au reste du projet. Les partenaires du projet ont donc choisi d'annuler ces essais.

- **organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés**

Cette action a été coordonnée et menée par deux partenaires : Le centre de Clermont-Ferrand de l'Irstea (site de recherche et d'expérimentation de Montoldre) et la Chambre régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB).

- **étapes et calendrier**

L'atelier de travail s'est déroulé le 12 octobre 2010 et le travail de synthèse bibliographique s'est étalé sur la totalité de la durée du projet.

- **résultats obtenus**

L'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 20). 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 (figure 12).

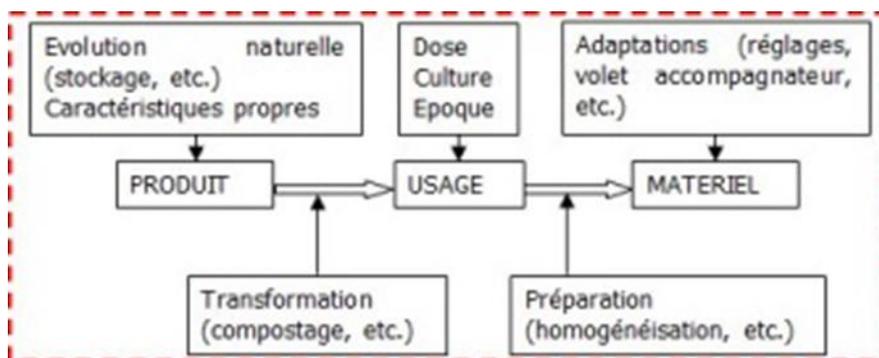
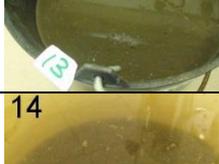


Figure 12 : Représentation de l'épandabilité et de ses facteurs.

N°	Photo	Identification	Epandabilité	Caractérisation
1		Fumier de bovin	Hérissons verticaux (table)	Pailleux, brins longs, sec, léger, densité 0,5, défaut (= peu cohésif)
2		Fumier de bovin mis au compostage	Bonne largeur de projection, facile à épandre, Hérissons verticaux (table)	Densité 0,6 – 0,8, paille broyée, humide, « collant », cohésif
3		Fumier de bovin composté vieux	Table (Hérissons verticaux mais pas trop), largeur de travail limitée mais bonne finesse d'épandage	Léger, granuleux, sec, dispersé, densité 0,5, ébouillant (= pas cohésif), Divisé grossier
4		Compost déchets verts	Pb répartition des éléments sur la largeur Table (Hérissons verticaux mais trop)	Granuleux non criblé, hétérogène (éléments grossiers et pulvérulents),
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

N°	Photo	Identification	Epanchabilité	Caractérisation
6		Boue de STEP égouttée à 14% MS	Table ou Hérissons verticaux Pb d'entraînement sur tapis continu (glisse)	Pâteux, solide, collant NB : le taux de MS est un critère discriminant dans ce groupe
7		Boue de STEP chaulée à 20% MS	Table ou Hérissons verticaux Pb d'entraînement sur tapis continu (glisse)	Densité un peu supérieure à 1, solide pâteux
8		Boue brute de STEP à 8-9% MS	Pendillard possible mais débit lent NB : l'ajout de qq % d'eau peut changer la consistance mais mélange, malaxage important !	Visqueux, collant
9		Lisier de bovin chargé	OK	En pleine fermentation, homogène ?, crémeux, pas de paille
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
11		Digestat solide à 25% MS (pressage = séparateur de phase)	Table (Hérissons verticaux) Pas de problème	Solide cohésif, humide, homogène, petites boules, densité proche de 1
12		Fumier de volaille (échantillon repris au godet plusieurs fois...)	Table	Paille broyée finement (brins courts), un peu mûré, densité 0,4
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)
14		Boue de STEP non floculée, sédimentée	Brasseur dans la tonne : pas toujours suffisant (vitesse décantation rapide) Au niveau agronomique : « inépanchable » Utiliser épandeur à circulation continue	Liquide, hétérogène (deux phases)
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 20** : Grille bilan de caractérisation de 15 échantillons, intégrant la description des effluents et les remarques faites par les professionnels concernant l'épandage.

Les travaux de synthèse bibliographiques ont donné lieu à la rédaction de deux documents de synthèse :

- le document intitulé « Description des outils de caractérisation physique des effluents d'élevage liquides, pâteux et solides » (Dieudé-Fauvel *et al.*, 2013) recense les techniques de caractérisation des propriétés physiques des effluents (liquides, pâteux, solides), en lien avec leur épandage (tableau 21) ;
- et le document intitulé « Les épandeurs d'effluents d'élevage : description des machines et des dispositifs d'épandage » (Thouzeau *et al.*, 2013) examine l'ensemble des techniques d'épandage existantes. 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).

Type d'outil	Matériau	Grandeur(s) caractérisée(s)	Unités de mesure	Lien produit/machine	Limitation
<b>Outils de terrain</b>					
Fluidimètre	Lisier	Temps d'écoulement	seconde	Indication sur le débit en sortie des épandeurs	-
Densimètre	Lisier	Densité (masse volumique)	kg/m <sup>3</sup>	Donnée à titre indicatif	Non adapté aux lisiers pailleux
Bocal de densité	Lisier	Densité (masse volumique)	kg/m <sup>3</sup>	Donnée à titre indicatif	
Systèmes de mesure de densité	Fumier	Densité	kg/m <sup>3</sup>	Donnée à titre indicatif	échantillonnage
Boîte à bouchage	Lisier	Tendance du produit à boucher un orifice	Index de 0 à 200	Bouchage des outils d'épandage en ligne	Volume nécessaire 1 m <sup>3</sup>
Pénétromètre	Fumier	Hétérogénéité et cohésion du produit	Interprétation visuelle et N.m <sup>-2</sup>	Fragmentation	Nécessite un grand nombre de mesures
Boîte de Casagrande	Fumier	Cohésion du produit	N.m <sup>-2</sup>	Fragmentation	Dispositif expérimental important
Scissomètre	Fumier	Cohésion du produit	N.m <sup>-2</sup>	Fragmentation	Nécessite un grand nombre de mesures
Foëne	Fumier	Cohésion du produit	N	Fragmentation	
Tire-bouchon	Fumier	Cohésion du produit	N	Fragmentation	
Fertimeter	Lisier	Détermination des unités fertilisantes	Azote, Phosphore, Potassium	Caractérisation chimique	Valeurs de référence non adaptées aux élevages français
Quantofix	Lisier	Teneur en azote ammoniacal	Azote	Caractérisation chimique	
Agrolisier	Lisier	Teneur en azote ammoniacal	Azote	Caractérisation chimique	
<b>Outils de laboratoire</b>					
Etuve et balance	Tous produits	Taux de matière sèche	% de matière sèche par rapport au poids humide	Donnée à titre indicatif	-
Texturomètre	Lisier et fumier	Pouvoir collant, plasticité, élasticité ou encore fracturabilité	Fonction de la grandeur mesurée	-	Matériel de laboratoire
Rhéomètre	Lisier et boues	Propriétés d'écoulement (viscosité, etc.)	Fonction de la grandeur mesurée	-	Matériel de laboratoire
Slump test	Fumier et boues ou digestats	Mesure du seuil d'écoulement (force nécessaire pour que le produit s'écoule)	Pa	Comportement éventuel du produit en fond de cuve (cisaillement tapis)	Outil adapté à des matériaux relativement homogènes

**Tableau 21** : Bilan des outils de caractérisation physique des effluents.

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 (« Epandage des effluents d'élevage liquides, pâteux et solides : relation matériau/matériel »). 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.

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).

#### ○ indicateurs de suivi

Le tableau 22 précise les engagements des partenaires en termes d'ETP.

	2010	2011	2012-2013	Total
<b>Irstea</b>				<b>9,32</b>
J-F. Devaux	0,05	0,09		0,14
F. Chabot	0,10			0,10
J. Mazoyer	0,05			0,05
E. Dieudé-Fauvel	1,35	0,7	0,91	2,96
M. Rousselet	0,08			0,08
Y. Pocrain (stagiaire)	3,60			3,60
J-F. Devaux		0,09		0,09
G. Brenon		0,18		0,18
J-C. Mégnien		0,54		0,54
A. Thouzeau (CDD)		1,58		1,58
<b>CRAB</b>				<b>2,72</b>
B. Decoopman	0,35	0,23	0,4	0,98
J-Y. Cosniers	0,3			0,30
F. Gauthier		0,6		0,60
P. Havard	0,14	0,06	0,64	0,84
<b>ITAVI</b>				<b>0,12</b>
C. Aubert (ingénieur)	0,09	0,03		0,12
<b>TOTAL</b>	<b>6,11</b>	<b>4,10</b>	<b>1,95</b>	<b>12,16</b>

**Tableau 22** : Tableau des temps de travail indicatifs affectés au sous-volet 2.2 du projet (ETP en mois).

Outre l'atelier de travail du 12 octobre 2010 qui a réuni de nombreux partenaires, la station des Cormiers (CRAB) et l'Irstea ont organisé plusieurs réunions téléphoniques de calage des actions.

#### ○ indicateurs de réalisation

Documents diffusables :

- Description des outils de caractérisation physique des effluents d'élevage liquides, pâteux et solides (annexe 8) ;
- Les épandeurs d'effluents d'élevage – Description des machines et des dispositifs d'épandage (annexe 9).

Documents internes au projet :

- Epandage des effluents liquides, pâteux et solides : relation matériau/matériel ;
- Rapport de stage « L'épandabilité des effluents d'élevage » de Yohann Pocrain (3,6 mois de stage à l'Irstea en 2010).

### III.4. Volet 2.3

#### ○ **rappel des objectifs attendus**

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). De façon plus spécifique, ce sous-volet avait pour objectifs :

- (i) d'établir des équations de prédiction des principaux paramètres de composition des effluents qui constituent la majeure partie du gisement des effluents (fumiers de bovins, lisiers de porc et fumiers de volailles),
- (ii) d'évaluer la faisabilité de la caractérisation directe en bâtiment et au champ de la composition des effluents par l'utilisation de la SPIR.

#### ○ **méthodes de travail utilisées**

Pour atteindre ces objectifs, l'équipe a organisé son programme de travail en deux actions.

**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 ( $\text{NH}_4$ ), en phosphore ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) et en potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ). 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 3 catégories de produits les plus représentatifs du gisement national (fumier de bovin, lisier de porc et fumier de volaille), 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 2012, 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)
- d'un fumier de bovins sur une parcelle immédiatement après épandage (20 échantillons prélevés, dans 5 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 Laboratoire et CIRAD Réunion) ont été harmonisés et une démarche d'intercomparaison des résultats analytiques et des mesures spectrales a été mise en place.

#### **Démarche expérimentale de l'action 1**

La démarche expérimentale proposée (figure 13) a résulté de la prise en compte des conditions nécessaires à l'obtention d'équations de prédiction de bonne qualité prédictive :

- 1<sup>ère</sup> condition : réaliser la démarche de paramétrage séparément pour chacune des catégories de produit. Pour cette raison, il a été décidé de conduire 3 démarches distinctes de calibration pour les 3 catégories de produits les plus représentatifs du gisement national, pour chacune des espèces animales, c'est-à-dire de s'intéresser au fumier de bovin, au lisier de porc et au fumier de volaille. L'idée est ensuite d'étendre la démarche à d'autres types de produits, dans le cadre d'autres projets.
- 2<sup>ème</sup> condition : faire cette calibration sur un effectif suffisant d'échantillons, de l'ordre de 150 échantillons de produits environ par catégorie de produits. Il a en fait été décidé de prélever 200 échantillons par catégorie de

produit, de faire les mesures SPIR qui sont peu coûteuses sur la totalité de ces échantillons pour les screener et utiliser les résultats de ces mesures pour sélectionner les 150 échantillons les plus intéressants pour la calibration, qui elle requiert de faire les analyses chimiques dont le coût est élevé. Pour une bonne calibration, les analyses chimiques de référence ont été faites en double. L'intérêt de cette démarche est qu'elle permet d'éviter de faire la calibration en aveugle et d'optimiser l'élaboration de l'effectif.

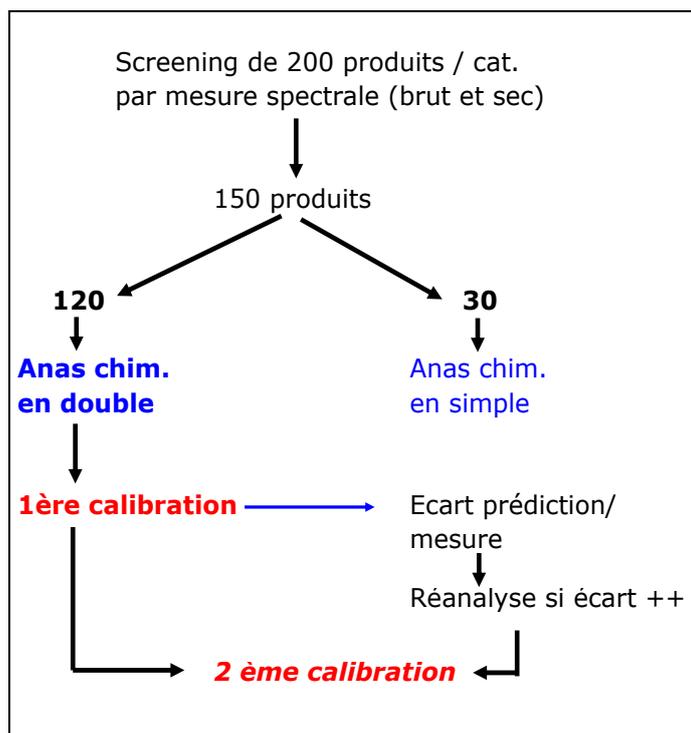


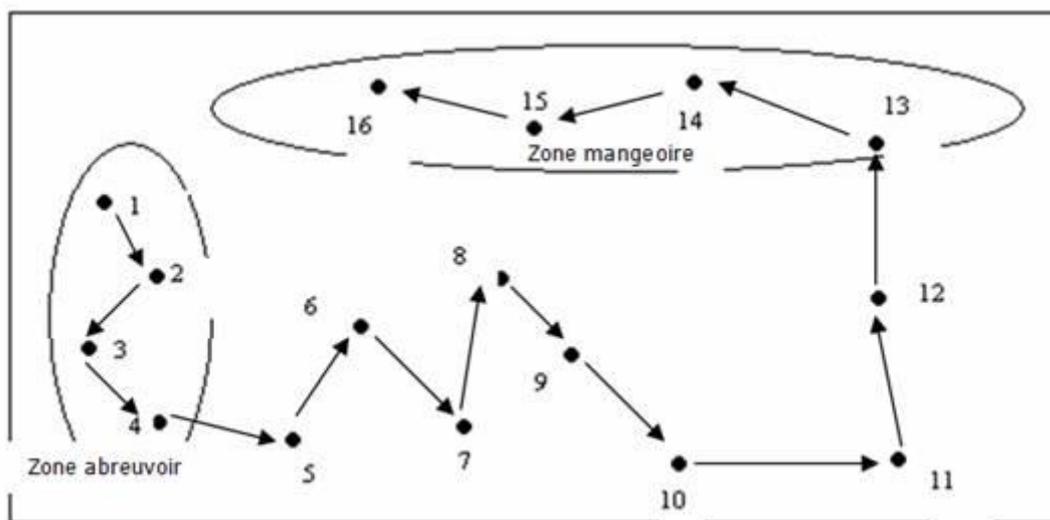
Figure 13 : Démarche adoptée pour la calibration SPIR (action 1).

## Démarche expérimentale de l'action 2

Une démarche expérimentale spécifique a été appliquée pour chaque type de produit (fumier de volailles en bâtiment et fumier de bovins sur une parcelle après épandage).

### - Mesures sur des litières de volaille en bâtiment d'élevage

Les spectres ont été acquis avec un appareil portable (LabSpec, ASD Inc.) dans des bâtiments d'élevage de volailles de l'île de la Réunion. Les mesures ont été faites immédiatement après le départ des animaux pour abattage, selon un plan d'échantillonnage présenté en figure 14. Les échantillons prélevés en chaque point ont été homogénéisés par brassage à la main dans un seau de 20 l. 10 prises de spectre ont été faites à la surface de chaque échantillon.



**Figure 14** : Stratégie de mesure et d'échantillonnage dans les bâtiments d'élevage de volailles.

- Mesures au champ dans le cadre de chantiers d'épandage de fumier de bovins

La campagne d'acquisition *in-situ* des spectres proche infrarouge de fumier de bovins pailleux composté a porté sur un total de 100 échantillons. Elle s'est déroulée entre mi-mars et mi-avril 2012 dans cinq exploitations agricoles du département de l'Ille et Vilaine retenues par J. Grall (CRAB). Les mesures ont été réalisées le jour même de l'épandage du fumier sur chacun des chantiers d'épandage, sur un prélèvement aléatoire de 20 échantillons (environ 1 kg par échantillon) répartis sur l'ensemble de la parcelle.

Après chaque prélèvement sur le terrain, l'échantillon a été mis dans un bac pour l'acquisition des spectres à raison de 4 répétitions en des points différents à la surface de l'échantillon. L'opération a été renouvelée après homogénéisation manuelle du produit qui a ensuite été conditionné dans un sac et placé dans une glacière.

Au laboratoire, les échantillons ont été congelés, un sous-échantillon conservé pour archivage sur une période de 2 ans et le reste homogénéisé par broyage au « Blixer ». Après homogénéisation, une quantité suffisante a été prélevée pour les mesures SPIR sur des échantillons frais décongelés, avec 4 répétitions par échantillon en des points différents pris à sa surface. Une autre partie a permis de réaliser des analyses de références des éléments NTK et N minéral. Une autre fraction des échantillons homogénéisés a été séchée à 60°C dans une étuve pendant 72 h. Une quantité suffisante de cette fraction a été broyée au couteau pour l'acquisition des spectres, et le reste, utilisé pour des analyses de références des éléments C, N, P et K.

La figure 15 récapitule l'ensemble du protocole expérimental. Toutes ces mesures spectrales ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre (Fieldspec Pro, ASD Inc.) qui opère dans la gamme spectrale de 350 nm à 2500 nm.

o **organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés**

Ce sous-volet a été coordonné par Thierry Morvan (INRA de Quimper) et Nathalie Damay (LDAR) pour la partie analyses de laboratoire. L'équipe était constituée du LDAR (N.Damay, H. Ducept, C Leroux), de l'INRA SAS (T. Morvan), du CIRAD (L. Thuriès), de l'ACTA (F. Butler), des Instituts techniques (P. Lévasseur, IFIP, C. Aubert, ITAVI, A. Charpiot, IDELE, R. Trochard, Arvalis) et des Chambres d'Agriculture (E. Dezat, CRA Bretagne, A. Loussouarn, CRAB, D. du Clary et J-F. Moreau, CA Vendée, L. Lejars, CA Loiret, A. Raveneau, CRA Lorraine).

Ce groupe de travail s'est entretenu régulièrement lors de réunions téléphoniques au cours desquelles les étapes et les réalisations ont été discutées et organisées. Elles ont été articulées en tenant compte du calendrier prévisionnel et des contraintes des ressources humaines (recrutement de CDD, stagiaires, congé maternité...).

**Action 1**

- Réflexion méthodologique et calage des méthodes entre laboratoires (2010 et 2011)

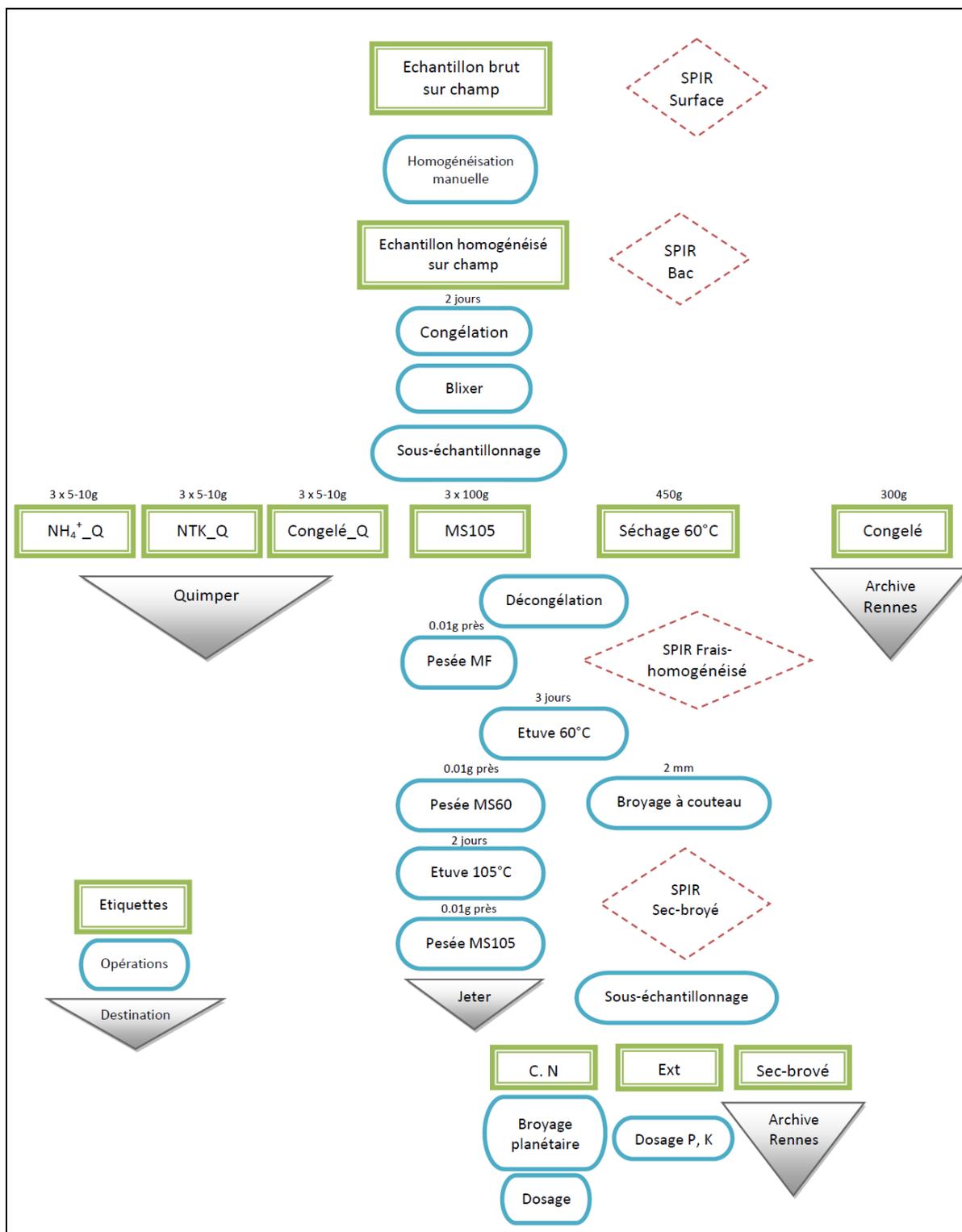
Un groupe de travail a été constitué par le LDAR, l'INRA, SAS Laboratoire et l'ACTA avec les partenaires du CIRAD, des Chambres d'Agricultures, de l'IFIP, l'ITAVI et l'IDELE pour réfléchir à ces aspects et organiser la campagne de collecte des 600 échantillons de produits.

Des documents ont été élaborés par le LDAR à partir d'une étude bibliographique et de documents fournis par les différents partenaires, avec un premier document définissant les méthodes d'échantillonnage à mettre en œuvre pour le prélèvement des échantillons, et une feuille de renseignements sur les caractéristiques de l'élevage dans lequel a lieu le prélèvement.

Le LDAR a également proposé de créer une base de données Access contenant les informations sur les échantillons collectés dans le cadre de cette action.

L'implication de plusieurs laboratoires dans les analyses et les mesures spectrales (LDAR, SAS Arvalis et CIRAD Réunion) nécessite également d'harmoniser les modes opératoires relatifs à la préparation des échantillons et les méthodes d'analyse, et de mettre en place une démarche d'intercomparaison des résultats analytiques et des mesures spectrales. L'étape d'harmonisation a été faite et validée par le groupe de travail.

Concernant la démarche d'intercomparaison, le CIRAD Réunion a pris en charge la préparation d'échantillons de référence des 3 types de produits, pour la mesure spectrale, permettant de standardiser les mesures spectrales entre les 3 laboratoires.



**Figure15** : Diagramme récapitulatif des différentes étapes du protocole expérimental mis en œuvre.

#### - Campagne de collecte des effluents

L'organisation de la campagne de prélèvement a représenté un travail important de l'année 2010, car la collecte d'un nombre aussi élevé de produits (presque 600) requiert un temps de prélèvement considérable, et le temps que les partenaires des Instituts et des Chambres avaient compté pour leur implication dans ce volet était de fait insuffisant pour atteindre cet objectif.

Une réunion a été organisée à Rennes le 18/10/2010 entre tous les partenaires impliqués dans les prélèvements, suivie d'une réunion téléphonique le 31/11/2010. Ces réunions ont permis de trouver une solution, qui a consisté à compléter les contributions des différents partenaires du volet par une prestation de service assurée par BCEL Ouest.

Le tableau 23 présente la répartition finale de la collecte des échantillons entre les différents partenaires de ce sous-volet. Les échantillons ont été transmis aux laboratoires accompagnés des données techniques descriptives des ateliers ayant produit ces produits.

Partenaire	Type d'effluent			Total
	FB	FV	LP	
Arvalis	5			5
BCEL ouest	93			93
CEMAGREF	4			4
Chambre d'agriculture de Bretagne		22	110	132
Chambre d'agriculture de Lorraine	22			22
Chambre d'agriculture de Vendée	8			8
Chambre d'agriculture du Loiret	10		10	20
IFIP			8	8
IDELE	38			38
ITAVI		50		50
LDAR	3	2	8	13
CIRAD	17	137	36	190
<b>TOTAL</b>	<b>200</b>	<b>211</b>	<b>172</b>	<b>583</b>

**Tableau 23** : Contribution des partenaires pour les prélèvements des effluents (FB : fumier de bovins, FV : fumier de volailles, LP : lisier de porc).

En 2011, le recrutement d'un CDD d'avril à décembre au LDAR a permis la réalisation de différentes tâches :

- organisation de la collecte des échantillons,
- réception et préparation des échantillons,
- répartition des différents échantillons entre les laboratoires,
- acquisitions spectrales et premières analyses
- création de la base de données (structure et différentes tables) et enregistrement des données (fiches parvenues au LDAR).

#### - Mesures SPIR

*En métropole*, les échantillons ont été collectés par le LDAR qui s'est ensuite chargé de répartir les échantillons entre les différents laboratoires pour les analyses à réaliser. A la réception, le LDAR a constitué des sous-échantillons pour analyse, envoi vers les autres laboratoires ou archivage. Une partie de chaque échantillon a été pré-séchée.

Plus des 2/3 des échantillons ont été traités par le LDAR. De mai à novembre 2011, le laboratoire d'ARVALIS à Boigneville a été mobilisé pour l'acquisition des spectres proche infrarouge sur le reste des échantillons, collectés au cours du printemps précédent (152 échantillons dont 98 fumiers de bovin et 54 lisiers de porc). Les analyses chimiques dites de référence (MS, N tot, N ammo) de ces échantillons ont été réalisées par SAS Laboratoire. L'ensemble des données (spectres + valeurs de référence) a été envoyé au CIRAD afin de développer les calibrations.

En 2012 et 2013, SAS laboratoire a été mis à contribution pour le traitement des données SPIR en collaboration avec le CIRAD, notamment sur la partie standardisation des 3 appareils du projet (CIRAD, LDAR, ARVALIS).

Les spectres ainsi que les déterminations matière sèche, azote total Kjeldahl, azote ammoniacal ont été acquis sur l'intégralité des échantillons.

*A la Réunion*, en collaboration avec les acteurs des filières animales, les échantillons ont été collectés, préparés pour analyse et analysés par le Cirad. L'acquisition des spectres PIR a été effectuée par le Cirad soit directement sur le terrain, soit au laboratoire, à l'aide de deux types d'appareillages dédiés aux applications de terrain et de laboratoire, respectivement. Au laboratoire, les spectres ont été acquis à l'état frais après homogénéisation au broyeur alimentaire (~1 cm), et à l'état partiellement séché après broyage fin (1 mm). Les teneurs en matière sèche ont été systématiquement mesurées, alors que les teneurs en azote total Kjeldahl, azote ammoniacal, azote Dumas, carbone Dumas et matière organique ont été mesurées sur une sélection d'échantillons après analyse de tous les spectres PIR. Le déroulement des étapes du travail ainsi que la répartition du travail sont résumés dans le schéma présenté en figure 16.

Par ailleurs, les modes opératoires pour la préparation des échantillons et les méthodes d'analyse (spectrale et chimique) ont été harmonisés (réunion du 13/01/2011).

- Réalisation des analyses chimiques de référence

A partir des résultats des premières analyses et des spectres, un premier screening a été effectué afin d'établir une première série d'échantillons pour la calibration. Sur cette série, les analyses des paramètres complémentaires (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O et MO) ont été effectuées en double.

Enfin les premiers résultats de la calibration ont permis de compléter la série d'échantillons pour la calibration (analyses en double) et la série d'échantillons utilisés pour la validation (analyses en simple). Mais ces résultats d'analyses chimiques n'ont pas servi dans le cadre du projet, car réalisées trop tardivement.

- Standardisation et harmonisation des mesures

Un essai inter-laboratoire (EIL) a été initié pour les deux types d'analyses :

- Afin de standardiser les mesures spectrales, le CIRAD Réunion a constitué trois échantillons de référence en cellules scellées dont les spectres ont été acquis (fin 2011) sur les trois appareils des trois laboratoires partenaires (CIRAD, LDAR et Arvalis/SAS). L'étape de standardisation (EIL spectral) a été finalisée par le CIRAD début 2012.
- Afin d'harmoniser les mesures chimiques, le CIRAD Réunion a constitué trois échantillons de référence qui ont été analysés (2011) par les trois laboratoires partenaires. Les résultats de cet EIL chimique ont été synthétisés début 2012 par le LDAR.

○ **étapes et calendrier**

Les travaux de ce volet se sont déroulés en 3 étapes :

- Etape 1 (mars 2010 à décembre 2011) :

- réflexion sur l'élaboration de la base de données de produits, par l'organisation de réunions avec les partenaires impliqués dans ce volet (INRA et LDAR coordonnateurs, ACTA, CIRAD, IDELE, IFIP, ITAVI, SAS Laboratoires, Chambres d'Agriculture) ;
- organisation et planification de la campagne de prélèvement et de collecte des échantillons (LDAR coordonnateur) ;
- collecte, préparation des échantillons pour analyse, archivage sous forme congelée et séchée ;
- mesures SPIR sur échantillons bruts (lisiers de porc) et sur échantillons bruts et séchés (fumiers de volailles et fumiers de bovins).

- Etape 2 (années 2012 et 2013)

- Standardisation des mesures SPIR entre les 3 laboratoires partenaires (CIRAD, Arvalis et LDAR) pour harmoniser les mesures spectrales (CIRAD) ;
- Screening des 3 effectifs de produits sur la base de la réponse spectrale et choix des produits sur lesquels les analyses chimiques de référence ont été réalisées (stage de H. Aitaissa) ;
- Réalisation des analyses chimiques par les laboratoires du CIRAD, le LDAR et SAS Laboratoire ;
- Mesures SPIR en bâtiment d'élevage de volailles à la Réunion (CIRAD) et au champ, après épandage de fumier de bovins (5 chantiers), par SAS INRA.

- Etape 3 (dernier trimestre 2012 et 1<sup>er</sup> semestre 2013) : analyse des données, premier travail de paramétrage d'équations de prédiction et communication.

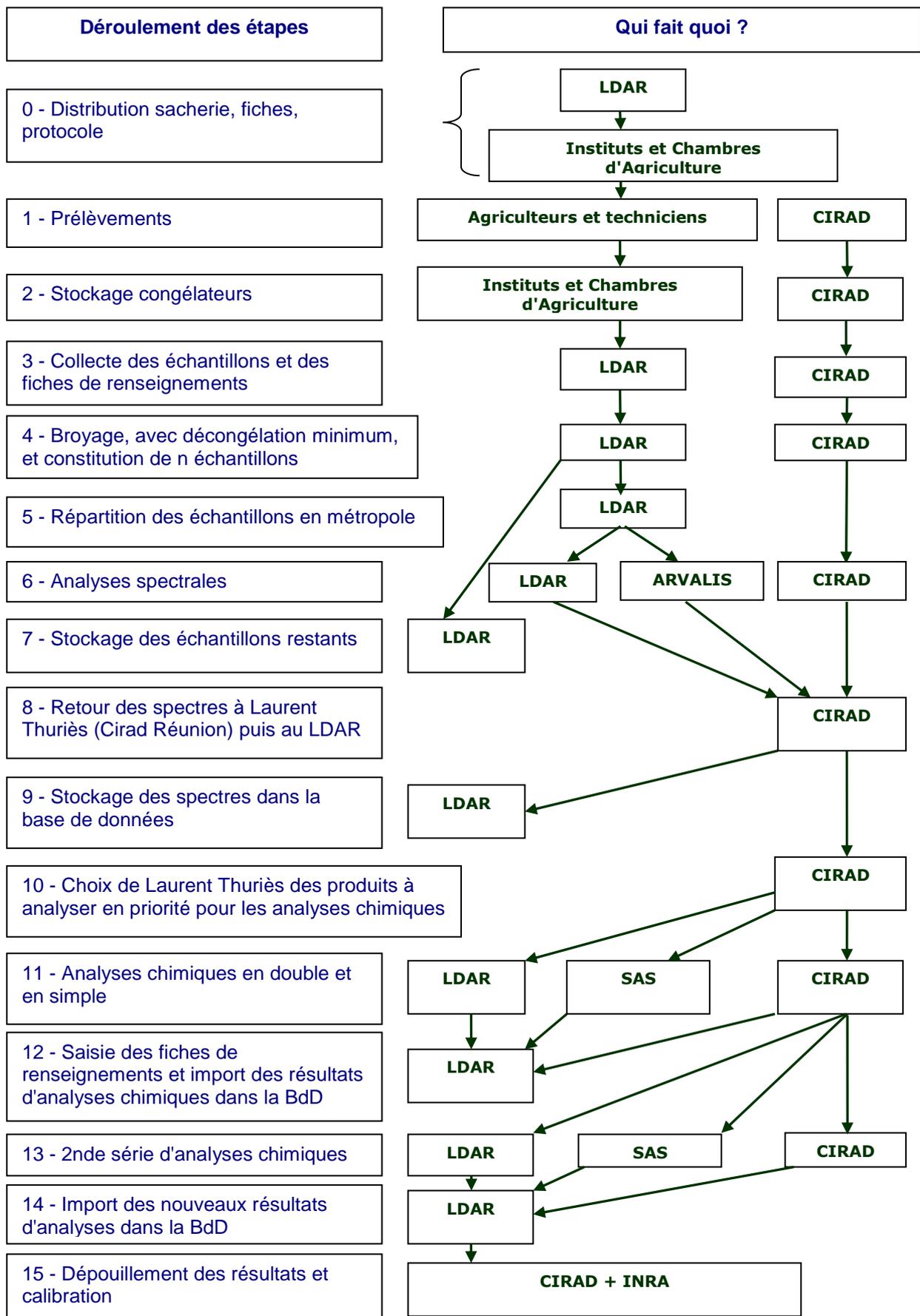


Figure 16 : Déroulement et répartition des tâches du sous-volet 2.3.

- **résultats obtenus**

### 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), il a été nécessaire de standardiser les réponses spectrales des différents appareils pour pouvoir traiter les données sur la même base, les réponses étant différentes selon les appareils (figure 17). Cette opération a été faite en soustrayant l'absorption par les contenants en verre, et par la mesure des spectres de cellules de référence scellées préparées par le CIRAD, sur tous les appareils. Le traitement des données a été fait avec le logiciel Win-ISI.

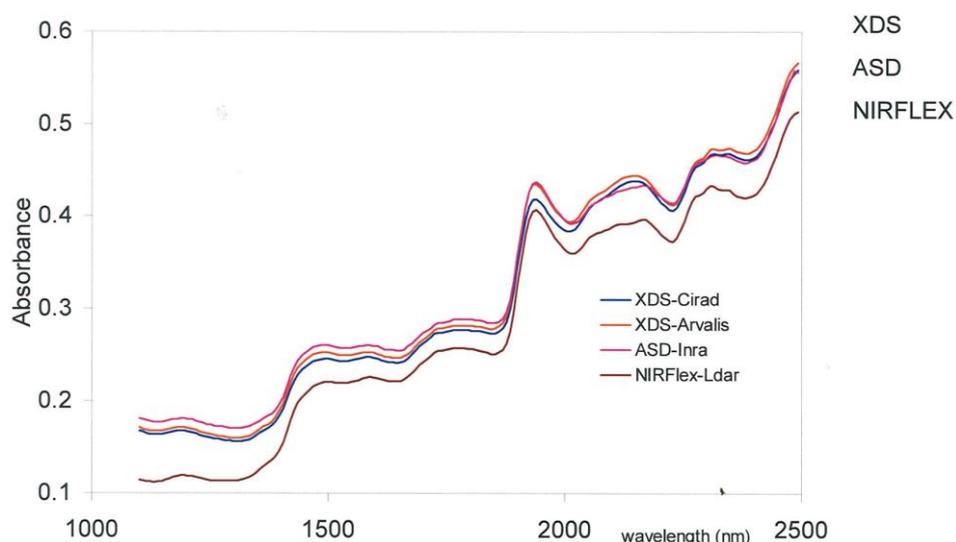


Figure 17 : Spectres mesurés par les différents appareils sur un échantillon de référence.

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.

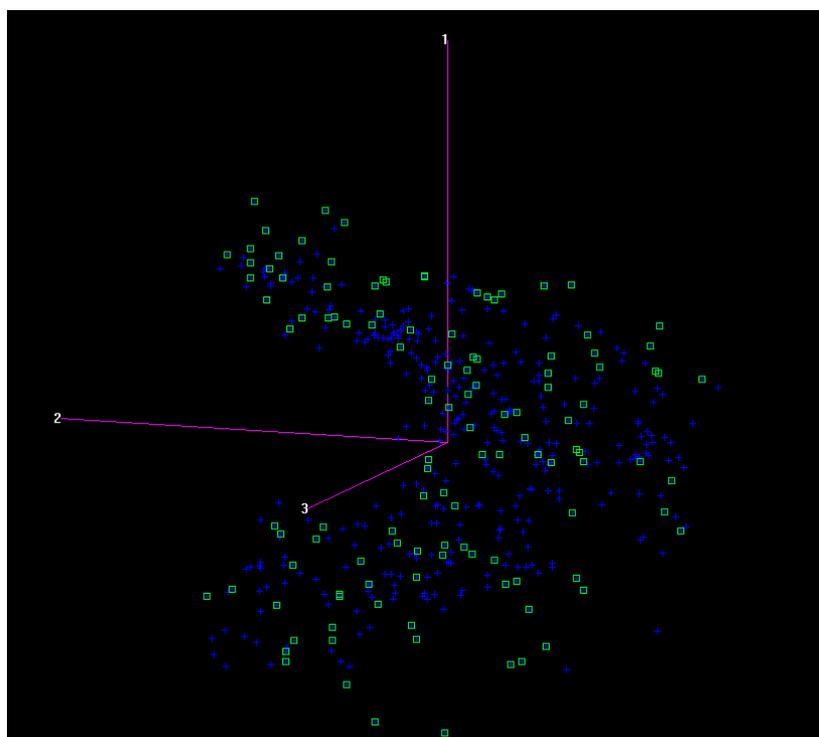


Figure 18 : Projection des échantillons de fumier de volailles sélectionnés sur l'effectif total.

Ce travail a été fait avec WIN ISI, avec une procédure qui utilise le concept de voisinage. Un voisinage est défini comme l'espace près d'un échantillon, et défini par une distance H. L'algorithme commence par trouver l'échantillon qui a le plus grand nombre de voisins. Cet échantillon est conservé et ses voisins sont éliminés. L'algorithme continue en trouvant l'échantillon suivant qui a le plus grand nombre de voisins parmi les échantillons restants. Cet échantillon est conservé et ses voisins sont éliminés. Le processus se poursuit jusqu'à ce que tous les échantillons aient été conservés ou éliminés. Grâce à cette méthode les échantillons sélectionnés couvrent toute la variabilité spectrale de l'ensemble des échantillons.

La figure 18 montre la bonne représentativité de l'effectif de litières de volailles retenu pour la calibration.

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

La figure 19 donne la comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par les équations issues du paramétrage de la mesure SPIR réalisées sur des échantillons 'frais' (non séchés), et le tableau 24 présente les statistiques de la calibration des modèles pour les 3 effluents. Pour les effectifs dépassant 100 échantillons, les modèles ont été élaborés par régression PLS (partial least square, moindres carrés partiels), sinon en MLR (multiple linear regression, régression linéaire multiple).

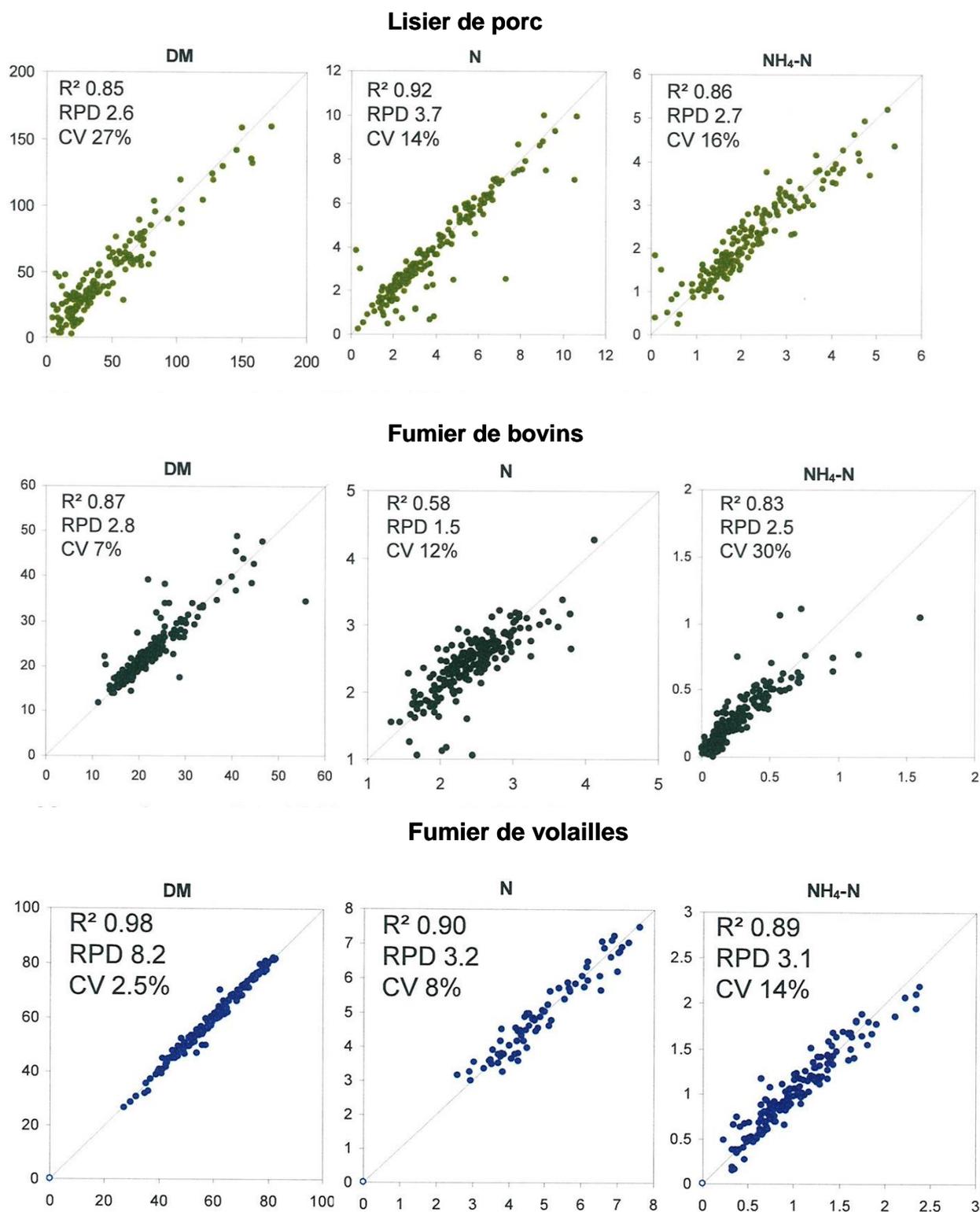
La performance des modèles établis varie selon le type de produit et selon le paramètre :

- Les modèles élaborés pour le lisier de porc sont les moins précis, avec un coefficient de variation supérieur à 25 % pour chacune des grandeurs prédites, et des valeurs de  $R^2$  faibles, respectivement égales à 0,50 pour N et 0,56 pour  $N-NH_4$ .
- Les modèles élaborés pour le fumier de bovins sont comparables aux modèles 'porcins' en termes de part de variance expliquée et de RPD, pour les teneurs en MS et pour N, mais avec de meilleures valeurs de CV et de ratio SEL/SECV. Le modèle est aussi nettement meilleur pour la teneur en  $NH_4$ .
- Les modèles obtenus pour le fumier de volailles peuvent être considérés comme bons pour les 3 paramètres, avec des valeurs de  $R^2$  proches ou supérieures à 0,90, de RPD supérieur à 3, et des valeurs de CV comprises entre 2,5 et 14 %. Un résultat important est lié au fait que les valeurs de SECV obtenues à partir de mesures faites sur des échantillons frais ne sont que 2 à 3 fois plus élevées que celles mentionnées par la bibliographie pour des échantillons séchés et finement homogénéisés par le broyage (Bastianelli *et al.*, 2007). Les rapports SEL/SECV montrent que les teneurs en MS et même les teneurs en  $NH_4$  sont bien prédites et que leur utilisation comme des méthodes alternatives aux analyses chimiques de référence est envisageable.

Constituent	set	n	Mean	SD	SECV	SEL/SECV	$R^2$	$\lambda$	RPDcv	CV%	regression
DM in % b.w.	PS	150	4.72	3.39	1.436	1.05	0.819	691	2.4	30	mPLS
	CM	166	20.9	3.88	1.361	1.00	0.876	691	2.8	7	mPLS
	PM	155	59.8	12.4	1.511	1.11	0.985	691	8.2	2.5	mPLS
	PM-farm	46	64.73	12.44	1.499	1.10	0.985	5	8.3	2.3	MLR
N in % DM	PS	144	9.81	3.53	2.482	22.1	0.501	691	1.4	25	mPLS
	CM	166	2.45	0.44	0.285	2.53	0.579	691	1.5	12	mPLS
	PM	74	4.93	1.22	0.382	3.40	0.901	8	3.2	8	MLR
	PM-farm	39	4.10	0.69	0.392	3.49	0.667	4	1.8	9.5	MLR
$NNH_4$ in % DM	PS	142	5.93	2.7	1.780	26.8	0.563	691	1.5	30	mPLS
	CM	170	0.25	0.18	0.074	1.12	0.834	691	2.5	30	mPLS
	PM	153	1.03	0.43	0.141	2.12	0.892	691	3.1	14	mPLS
	PM-farm	45	0.96	0.41	0.097	1.46	0.942	5	4.2	10	MLR

n is the number of spectra used for modeling; SD standard deviation; SECV standard error of cross-validation; SEL/SECV ratio standard error of laboratory / SECV;  $R^2$  coefficient of determination;  $\lambda$  is the number of wavelengths used by the models; RPDcv ratio SD / SECV; CV% coefficient of variation; regression type is modified partial least square or multiple linear

**Tableau 24 :** Paramètres statistiques des modèles élaborés pour le lisier de porc (PS), le fumier de bovins (CM), le fumier de volailles (PM) à partir de mesures de spectres sur des échantillons homogénéisés en frais au laboratoire, et de mesures de spectres réalisées en bâtiment pour le fumier de volailles (PM-farm).



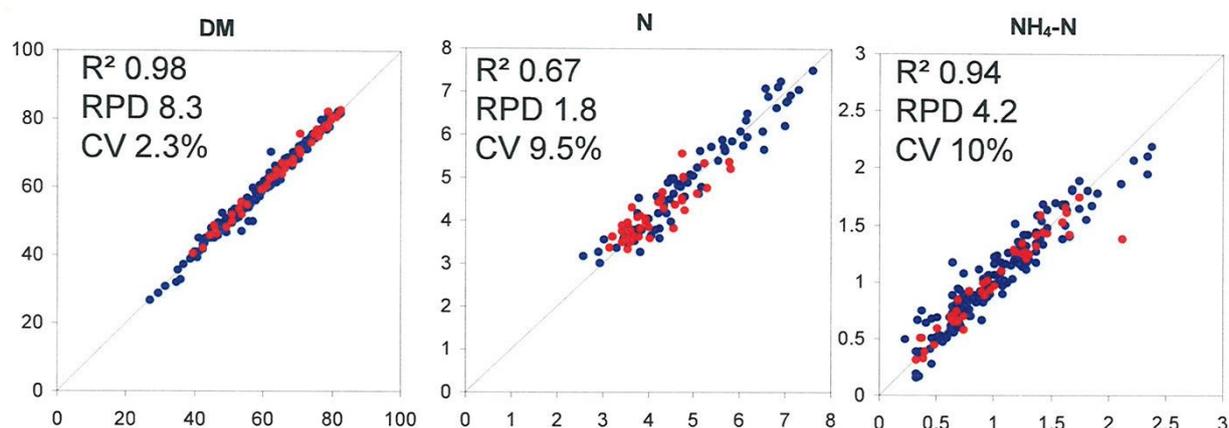
**Figure 19** : Comparaison des valeurs prédites (en abscisse) et mesurées (en ordonnée) pour les 3 effluents et pour les 3 teneurs paramétrées (DM : teneur en MS, en %, teneur en N et N-NH<sub>4</sub> en g L<sup>-1</sup> pour les lisiers de porc, et en g 100 g<sup>-1</sup> MS pour les fumiers de bovins et fumiers de volailles).

## 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 (tableau 23 et figure 20) ; même

pour N, pour lequel le  $R^2$  est inférieur à 0.7, les valeurs de SECV, SEL/SECV et CV demeurent tout à fait comparables. Une voie d'amélioration serait d'étendre la base de données 'bâtiment', ce jeu de données n'étant égal qu'à la moitié du jeu de données obtenu au laboratoire.



**Figure 20** : Comparaison des valeurs prédites et mesurées pour le fumier de volailles (points bleus : mesures au laboratoire, et points rouges : mesures en bâtiment).

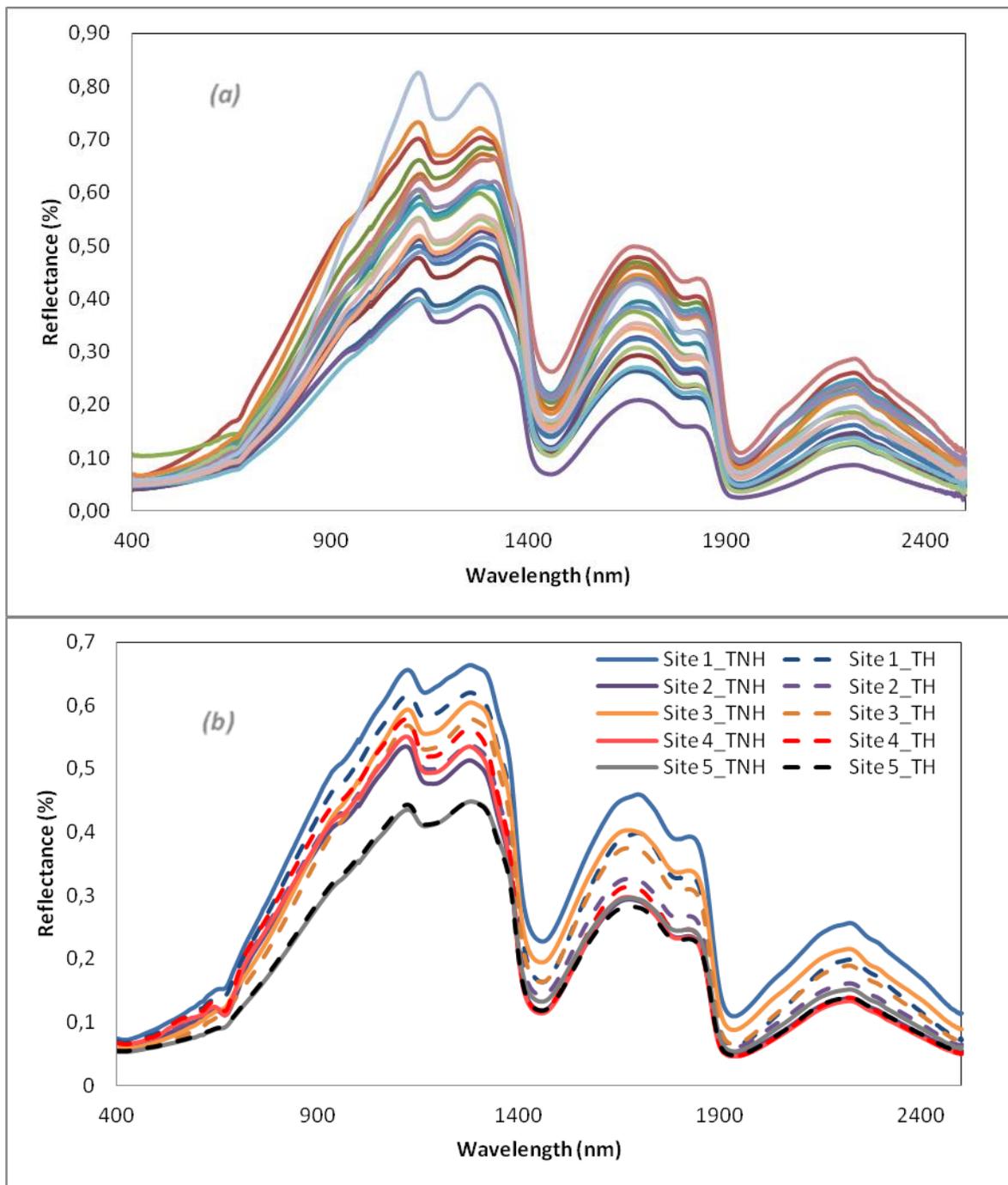
### Mesures au champ de fumier de bovins

Dans un premier temps des statistiques descriptives sur les données analytiques ont permis d'avoir des informations sur la gamme de variations des teneurs des différents éléments considérés, leur valeur moyenne ainsi que l'écart type de la population. Dans un second temps une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les variables chimiques et une autre sur la base des spectres. Dans les deux cas les individus sont projetés dans le premier plan factoriel afin d'explorer la variabilité au sein de la population et pour détecter les éventuels individus atypiques (« outliers ») pour les exclure de l'étude.

Nous avons ensuite mis en œuvre une méthode de calibration multivariée qui s'appuie sur l'algorithme de la régression PLS (Partial Least Squares) pour calibrer des modèles spectraux permettant de prédire les différentes variables d'intérêts que nous avons retenues. Les modèles ont été calibrés par la méthode de validation croisée « leave-one-out » et on compare les valeurs prédites par le modèle aux valeurs de références issues des analyses conventionnelles de laboratoire. Nous avons testé différents prétraitements sur les spectres de réflectance et le prétraitement qui donne les meilleures performances statistiques a été retenu. Nous avons évalué les performances des modèles ainsi calibrés grâce aux critères statistiques suivants :  $R^2$ , root mean square error (RMSE), mean error (ME) et ratio of prediction deviation (RPD), qui est donné par le rapport entre l'écart-type des observations et le RMSE.

La figure 21(a) montre les 20 spectres acquis sur le site 3 après homogénéisation manuelle. 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 est variable.

La réflectance étant le résultat d'une interaction rayonnement-matière qui dépend à la fois de la composition chimique (organique et minérale) de la matière et de ces 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 il est difficile à ce stade de dire dans quelle proportion chacun de ces facteurs influence la réponse spectrale d'un échantillon à l'autre. La figure 7(b) montre également que l'allure générale du spectre moyen des spectres acquis sur le terrain pour chaque site est la même mais que l'amplitude totale est variable. En outre, on peut aussi voir sur cette figure que 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.



**Figure 21** : Spectres de réflectance acquis sur le terrain : (a) échantillons homogénéisés du site 3 ; (b) spectres moyens des 5 sites homogénéisés et non homogénéisés (TH : terrain homogénéisé et TNH : terrain non homogénéisé).

En conclusion et de manière qualitative, la différence de la réponse spectrale observée, au sein d'un même site ou entre 2 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 chose complexe du fait, comme déjà précisé, que chaque spectre est la résultante de l'interaction de la lumière avec l'ensemble des paramètres physico-chimiques de l'échantillon considéré. Il en découle que pour mettre en relation, et de manière quantitative, le spectre avec les paramètres utiles de l'échantillon (Ctot, Corg, Ntot, N-NH<sub>4</sub>, etc.), il est nécessaire de passer par des méthodes statistiques relativement élaborées du type calibration multivariée. Après avoir exploré l'hétérogénéité de notre jeu de données à l'aide de deux ACP (résultats non présentés ici), la première sur les données analytiques et la seconde sur les spectres, nous avons mis en œuvre l'algorithme de la régression PLS (Partial Least Squares) pour calibrer nos modèles de prédiction. Nous avons ensuite calibré nos modèles de prédiction à l'aide de la méthode de validation croisée « leave-one-out » et pour chacun des paramètres à prédire le modèle retenu est celui pour lequel le RMSE est le plus faible et le R<sup>2</sup> le plus élevé.

Le tableau 25 récapitule les performances de l'ensemble des modèles calibrés à partir des spectres acquis sur des échantillons frais sur le terrain (TNH et TH) et au laboratoire après « blixage » (FH), et sur des échantillons séchés à 60°C puis broyés (SB).

On constate d'après ce tableau que pour l'ensemble des paramètres testés sur les spectres acquis sur le terrain TNH et TH les performances des modèles sont proches. Ce résultat est cohérent avec l'observation faite sur les spectres moyens intrasites pour lesquels il n'y avait pas de différence significative entre les spectres TNH et TH. Par ailleurs, le critère statistique RPD est un indicateur de la qualité de prédiction du modèle calibré, en termes de précision des prédictions. D'après ce critère un modèle est performant lorsque  $RPD \geq 2$  et qu'il est de performance satisfaisante lorsque  $1,8 \leq RPD < 2$ . Si on se base sur ce critère, il apparaît que dans le cas des mesures terrain, TNH et TH, les seuls paramètres pour lesquels nous avons des modèles calibrés de performances satisfaisantes sont le N-NH<sub>4</sub> (‰ du brut) et le N-NH<sub>4</sub> (g/kg MS) avec  $1,8 < RPD < 2$ , à l'exception du N-NH<sub>4</sub> (‰ du brut) pour TH pour ce paramètre vaut 1,71. Par contre, si pour les autres paramètres, MS et Norg, la précision des prédictions est moins bonne les modèles calibrés permettraient, néanmoins, d'avoir des ordres de grandeurs de ces paramètres.

		N	R <sup>2</sup>	RMSE	ME	RPD	
Frais	TNH	MS (%)	99	0.53	2.75	0.002	1.47
		<b>N-NH<sub>4</sub>+ (‰ du brut)</b>		<b>0.72</b>	<b>0.31</b>	<b>0.004</b>	<b>1.87</b>
		Norg (‰ du brut)		0.537	0.793	-0.025	1.47
		<b>N-NH<sub>4</sub>+ (frais en g/kg MS)</b>		<b>0.75</b>	<b>1.64</b>	<b>0.018</b>	<b>1.99</b>
	TH	MS (%)	99	0.53	2.75	-0.025	1.47
		<b>N-NH<sub>4</sub>+ (‰ du brut)</b>		<b>0.66</b>	<b>0.34</b>	<b>0.001</b>	<b>1.71</b>
		Norg (‰ du brut)		0.611	0.721	-0.014	1.61
		<b>N-NH<sub>4</sub>+ (frais en g/kg MS)</b>		<b>0.72</b>	<b>1.73</b>	<b>0.01</b>	<b>1.89</b>
	FH	MS (%)	100	<b>0.83</b>	<b>1.665</b>	<b>-0.021</b>	<b>2.41</b>
		<b>N-NH<sub>4</sub>+ (‰ du brut)</b>		0.57	0.375	-0.001	1.52
		Norg (‰ du brut)		0.63	0.707	-0.009	1.64
		<b>Ctot (%frais)</b>		<b>0.75</b>	<b>0.849</b>	<b>-0.026</b>	<b>2.00</b>
<b>N-NH<sub>4</sub>+ (frais en g/kg MS)</b>			<b>0.69</b>	<b>1.818</b>	<b>-0.011</b>	<b>1.79</b>	
Séchés à 60°C	SB	MS (%)	100	<b>0.72</b>	<b>2.139</b>	<b>0.04</b>	<b>1.88</b>
		<b>Ctot (g/kg MS)</b>		<b>0.69</b>	<b>32.305</b>	<b>-0.313</b>	<b>1.81</b>
		Ntot (g/kg MS)		0.54	2.147	0.004	1.48
		<b>C/N</b>		<b>0.70</b>	<b>1.503</b>	<b>-0.012</b>	<b>1.85</b>
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg MS)		0.60	1.525	-0.045	1.56
		<b>K<sub>2</sub>O (g/kg MS)</b>		<b>0.76</b>	<b>3.769</b>	<b>-0.06</b>	<b>1.99</b>

**Tableau 25 :** Performances des modèles spectraux calibrés par validation croisée « leave-one-out » sur des échantillons frais et séchés à 60°C. N : Effectif ; TNH : Terrain Non Homogénéisé ; TH : Terrain Homogénéisé ; MS : Matière Sèche.

Concernant les échantillons frais homogénéisés (FH) passés au blixer, le tableau 23 montre que pour les variables MS et Ctot (% du frais) les modèles calibrés sont considérés comme performants, RPD de 2,41 et de 2 respectivement. Par contre, le modèle calibré pour le N-NH<sub>4</sub> (g/kg MS) est à la limite des performances satisfaisantes (RPD = 1,79) et dans le cas du N-NH<sub>4</sub> (‰ du brut) et Norg les modèles sont de moins bonne précision avec des RPD de 1,52 et 1,64 respectivement. Dans le cas des échantillons séchés à 60°C et broyés le RPD varie entre 1,8 et 2 pour MS, Ctot, C/N et K<sub>2</sub>O. Pour les variables Ntot et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> il est respectivement de 1,48 et 1,56.

Ce travail préliminaire réalisé sur 100 échantillons de fumier de bovins pailleux composté provenant de 5 sites différents avait, initialement, pour objectif de calibrer des modèles de prédictions relatifs aux teneurs en C et N à partir de mesures de réflectance acquises sur le terrain. Malgré une taille de l'échantillon relativement petite, nos résultats montrent que des corrélations existent bien entre la réflectance spectrale et certains des paramètres que nous avons considérés. Et les prédictions des modèles calibrés à partir des mesures terrain sont satisfaisantes à moyennement satisfaisantes. Les modèles avec les meilleures performances ont été obtenus sur des échantillons frais (FH) homogénéisés au laboratoire. Ce travail devrait se poursuivre afin (i) d'augmenter la

taille de la population en intégrant d'autres sites, (ii) de mener une réflexion sur la manière d'améliorer l'acquisition des spectres sur le terrain, et (iii) de valider 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 dans la capacité de déterminer à quelle classe de composé appartient un produit, dans ce cas la méthode basée sur la spectrométrie proche infrarouge semble très prometteuse. En effet, si bien évidemment ce travail mérite d'être poursuivi pour affiner et valider les résultats déjà obtenus, il nous apparaît plus judicieux et plus pertinent de le faire évoluer dans ce sens. Autrement dit, 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.

## Conclusion

- Nous avons montré que le paramétrage d'équations prédictives des teneurs en MS, N et N-NH<sub>4</sub> à partir de mesures SPIR réalisées sur des échantillons non séchés et non finement broyés donne des résultats satisfaisants pour les 3 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 également 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 NH<sub>4</sub> 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.
- Enfin, les mesures SPIR réalisées directement en bâtiment d'élevage ou immédiatement après le chantier d'épandage donnent des résultats prometteurs et permettent d'envisager de prolonger ces travaux.
- Il n'a pas été possible sur la durée du programme de traiter les données relatives aux teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O des produits, ni les valeurs de référence pour la validation sur les teneurs en MS, N et NH<sub>4</sub>. Les mesures chimiques de référence ayant été faites, il reste donc à conduire l'étape de paramétrage des équations de prédiction.

### o indicateurs de suivi

Agents	Tâches réalisées	2010	2011	2012	2013	Total
<b>Cirad</b>		<b>4,02</b>	<b>13,05</b>	<b>6,69</b>	<b>0,33</b>	<b>24,09</b>
L. Thuriès (chercheur)		2,67	2,61	2,64	0,15	8,07
G. Moussard (technicien)		1,35	1,44	1,05	0,18	4,02
A. Bazot (stagiaire)			7,00			7,00
N. Essouf Kamby (stag.)			2,00			2,00
H. Aitaïssa (stagiaire)				3,00		3,00
<b>INRA</b>						<b>7,6</b>
Th. Morvan (IE1)	échantillonnage, protocole, discussion des résultats	1,0	1,9		2,0	4,9
F. Youssef (MC -> CR2)			0,5		1,0	1,5
V. Parnaudeau (IE1)					1,2	1,2
<b>LDAR</b>						<b>14,85</b>
N Damay (ingénieur)	Animation du volet, org° collecte échant., harmonisation méthodes d'analyses...	1,20	0,79	0,21	0,05	2,35
C Le Roux (ingénieur)		0,60	0,64	0,38	0,13	1,75
H Ducept (ingénieur)	Calibration de la SPIR, coordination avec le Cirad		0,59		0,60	1,19
J Gogibus (technicien)	Echantillonnage, analyses chimiques et spectrales, BdD		9,06			9,06
M Bisiaux (technicien)	Campagne de collecte		0,50			0,50

Agents	Tâches réalisées	2010	2011	2012	2013	Total
<b>ITAVI</b>						<b>2,79</b>
C. Aubert (ingénieur)	Réflexion et analyses	0,24	2,3	0,24		2,79
<b>CRA Bretagne</b>						<b>0,78</b>
A. Loussouarn (ingénieur)	prélèvements		0,69			0,69
B. Le Bris (ingénieur)	prélèvements	0,09				0,09
<b>CRA Lorraine</b>						<b>2,04</b>
A. Raveneau (ingénieur)	prélèvements	0,72	0,72	0,6		2,04
<b>SAS Laboratoire</b>						<b>0,5</b>
M Valé	Analyses chimiques et spectrales	0,1	0,1	0,25	0,05	0,5
<b>Arvalis</b>						<b>1,36</b>
R. Trochard (ingénieur)	prélèvements	0,11				0,11
S. Trupin (ingénieur)	acquisition spectres infrarouge, traitement données, 2 réunions (18/06 et 14/08/2012)	0,11	0,11	0,34		0,56
S. Aubert				0,23		0,23
D. Contesse (technicien)	acquisition des spectres proche infrarouge		0,09			0,57
A. Laroche (technicien)			0,20			
B. Moulinier (technicien)			0,28			
<b>TOTAL</b>						<b>54,55</b>

**Tableau 26** : Participation indicative des partenaires au sous-volet 2.3 (en mois).

Outre les nombreux échanges de messages électroniques, les partenaires ont organisé 6 réunions de travail les 14 janvier (physique à Paris), 11 mai (téléphonique), et 18 octobre (physique à Rennes) et 31 novembre 2010 (téléphonique), puis les 18 juin et 14 août 2012 (téléphoniques).

#### ○ indicateurs de réalisation

Les résultats majeurs acquis au cours de ce projet sont la constitution d'une base de données spectrales, l'obtention de modèles de calibration SPIR pour les teneurs en MS, N et N-NH<sub>4</sub> des trois principaux effluents d'élevage produits en France (fumiers de bovins, de volailles et les lisiers de porcs), que ce soit à partir d'effluents passés en 'frais homogénéisés' sur des appareils de laboratoire, ou même à partir d'appareils portables directement sur le terrain, sans que les performances ne soient très fortement dégradées. De plus, ces équations sont associées pour chacun des 3 produits analysés à une base de données de 200 échantillons rassemblant les caractéristiques des élevages les ayant produits et les compositions analytiques.

Le stage de fin d'études de Hanane AITASSA a par ailleurs donné lieu à un rapport intitulé « Amélioration de la prédiction de la composition des effluents d'élevage par Spectroscopie Proche Infrarouge » (annexe 11).

### III.5. Volet 3

#### ○ **rappel des objectifs attendus**

Dans les différentes filières, certains produits posent problème pour garantir un épandage satisfaisant au plan agronomique et environnemental ou sont encore mal caractérisés car nouveaux ou très variables. Un « nouveau produit » est défini comme étant (i) soit peu présent aujourd'hui dans les élevages, mais amené à se développer rapidement compte tenu des contextes spécifiques à chaque filière, (ii) soit plus ou moins développé mais les références que nous en avons actuellement sont incomplètes. Il n'existe généralement que peu ou pas de données concernant la composition de ces matières, et les techniques de transformation afin de les rendre conformes à une norme engrais ou amendement organique, ou d'en améliorer l'épandabilité ne sont pas encore calées. Or, elles sont indispensables pour bien conseiller les producteurs et alimenter les modèles.

Ce volet visait à caractériser des produits issus de nouvelles techniques de traitement ou dont les connaissances sont incomplètes, par l'acquisition de références en termes de composition et/ou d'aptitude à l'épandage, en vue de leur valorisation optimale en agriculture.

#### ○ **méthodes de travail utilisées**

Les travaux menés dans ce 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 suite au constat du fait que les effluents travaillés ou transformés (p.ex. lisier de bovin tamisé) ne posaient plus guère de problème à l'épandage.

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 5 « nouveaux produits » suivants ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une caractérisation dans le cadre de ce volet :

1. Lisier de bovin issu de séparateur de phases
2. Compost de fèces de porc issues du raclage en V
3. Compost de fumier pailleux de truies gestantes
4. Compost de fumiers de volaille traités avec un activateur de compostage
5. Digestats bruts de méthanisation.

Les fumiers issus des nouvelles litières de volaille de chair à base de miscanthus voire de colza n'ont pas été retenus. Pour les digestats de méthanisation, les objectifs de travail ont évolué principalement pour mieux intégrer l'action de ce projet dans les nombreux dossiers qui débutaient sur la question.

#### ○ **organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés**

Ce volet a été coordonné par la CRAB (pôles Recherche appliquée Porcs-Aviculture et Agronomie) en partenariat avec l'idele, l'ITAVI, l'IFIP et 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.

Les cinq nouveaux produits retenus ont été étudiés indépendamment les uns les autres. De ce fait, les méthodes et résultats sont présentés plus bas, produit par produit.

#### ○ **étapes et calendrier**

En début de projet, un inventaire des déjections animales a été retravaillé après concertation avec les divers partenaires y compris des coopératives. Il a débouché sur une liste finalisée de produits à travailler légèrement différente de ce qui avait été pressenti.

L'équipe a ensuite procédé à la sélection des « nouveaux produits » à étudier, en fonction de la connaissance à acquérir sur des PRO qui présentaient des possibilités de développement et n'étaient pas déjà en cours de caractérisation dans le cadre d'autres dossiers.

Puis les laboratoires (essentiellement le LDAR) et les divers instituts et les chambres ont été contactés pour collecter des échantillons à analyser, et harmoniser les protocoles.

○ **résultats obtenus**

**Lisier de bovin tamisé**

Cette étude portant sur la caractérisation agronomique des **coproduits liquides et solides** issus de la séparation de phases mécanique des effluents d'élevages bovins, a été menée par l'Institut de l'Elevage avec l'appui de la CRAB.

Cette sous-action avait été considérée comme prioritaire car l'augmentation de la taille des élevages se traduisant naturellement par une augmentation de la quantité d'effluents produits sur la ferme, elle entraîne des difficultés de gestion des déjections bovines, notamment pour leur stockage et leur transport (fosses trop petites, coût de transport des effluents aqueux vers des zones éloignées...). Par ailleurs, certains effluents (fumiers mous, lisiers pailleux) pouvant être classés d'intermédiaires, 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.

L'Institut d'Elevage, en lien avec la CRAB, a suivi 7 élevages (tableau 27) 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, pour séparer leurs effluents en deux phases : une phase liquide épandable sans difficulté à l'aide de pendillards, et une phase solide épandable avec des épandeurs à fumier classique.

Nom de l'exploitation	Hydrocurage	Logettes raclées	Tamis	Vis presse
Gaec Dausy	-	X	-	X
Gaec Le Moulin du Kerollet	X	X	X	-
Gaec de l'Alliance	X	X	-	X
Gaec du Panco	X	X avec tapis	X	-
Gaec Le Nouveau Noyer	-	X avec matelas	-	X
Gaec de la Vallée Blanche	-	X	-	X
Gaec des 2 Landes	-	X	-	X

**Tableau 27** : Liste des exploitations suivies avec les spécificités de bâtiments et le type de séparateur (X : oui, - : non).

Avant de débiter la phase d'expérimentation, un protocole a été établi. Le suivi a porté sur la quantification des volumes de déjections transitant en un temps donné par le séparateur (volume d'effluents bruts avant séparation et volume de la phase solide séparée, le volume de la phase liquide étant obtenu par différence). Les synthèses de ces suivis ont été réalisées entre fin 2012 et 2013. Le choix et le suivi des exploitations ont principalement été réalisés par l'IDELE avec un appui de la CRAB. Le traitement et la mise en forme des données ont été effectués de façon collaborative par ces deux organismes.

PRO analysés	Analyse agronomique	Analyse de minéralisation de l'N
Lisier brut	9	
Lisier filtré	9	
Phase solide fraîche	9	
Phase solide évoluée (après plusieurs mois de stockage)	7	2

**Tableau 28** : Type et nombre d'analyses pratiquées.

Des échantillons ont été prélevés avant (lisier brut) et après séparation (phase liquide et phase solide fraîche et évoluée) en vue de leur analyse (pH, densité, matière sèche, matière organique, azote total, azote ammoniacal,

phosphore et potassium) [Tableau 28]. 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.

### Synthèse des principaux résultats :

En première approche, les caractéristiques analytiques de ces produits se rapprochent des caractéristiques d'un fumier mou de logettes (source : Fertiliser avec les engrais de fermes, 2001) avec une teneur en matière sèche un peu plus élevée.

En comparaison du lisier brut, la phase liquide perd 3 à 4 points de matière sèche et 2 à 3 points de matière organique (figure 22). La séparation avec tamis semble être un peu plus poussée qu'avec vis dans la phase solide (MS, MO et les éléments azotés sont légèrement plus faibles dans les lisiers filtrés par tamis que par vis).

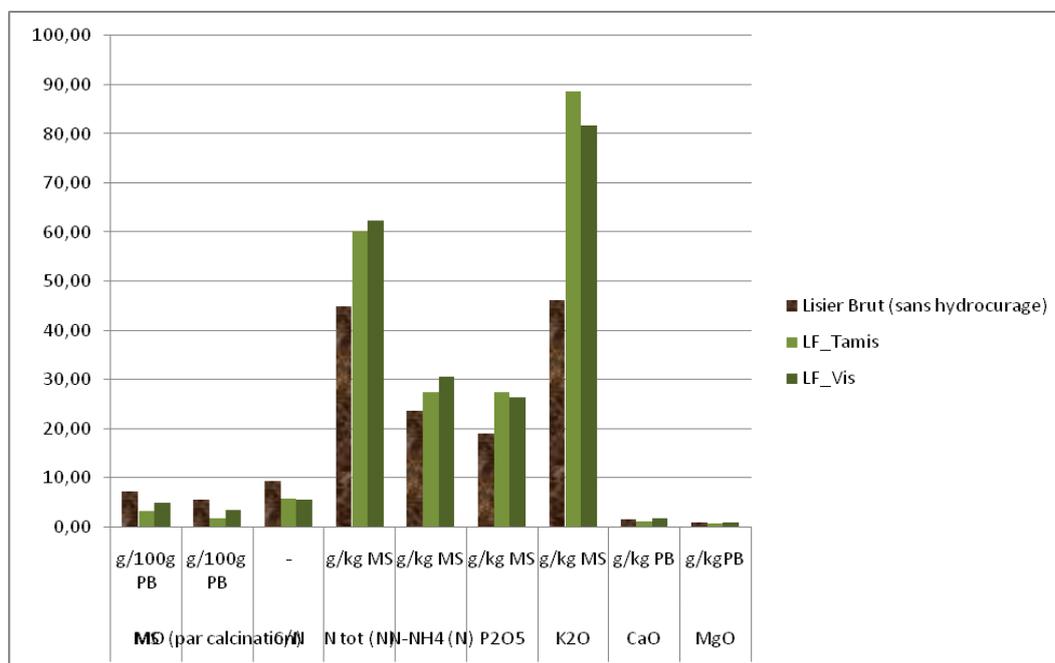


Figure 22 : Caractérisation des produits issus de séparation (tamis et vis) en comparaison du lisier brut (LF = lisier filtré).

Il apparaît que les caractéristiques physiques et chimiques 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'N 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.

### Compost de fèces de porc issus du raclage en V

Cette étude portant sur la caractérisation agronomique du compost de fèces de porc provenant d'élevages équipés de racleurs en V, une nouvelle technique de séparation de phases urines/fèces en bâtiment porcs, a été menée par la CRAB.

Cette technique est apparue prometteuse suite aux essais réalisés, entre autres, à la station expérimentale de Guernévez (CRAB Finistère). Le fond de fosse en forme de V permet de collecter les urines en continu dans une gouttière centrale. Les fèces sont raclées plusieurs fois par jour et poussées à l'extérieur de la porcherie. Le faible temps de contact entre urines et fèces dans la porcherie permet de réduire de 50 % les émissions d'ammoniac au bâtiment. Deux nouveaux produits sont obtenus : la fraction liquide riche en azote et la fraction solide qui représente 38 % de la masse des déjections. Cette dernière concentre 90 % du phosphore, 55 % de l'azote et 45 % du potassium. Ce procédé se développe rapidement, non seulement du fait de la réduction des émissions d'ammoniac en bâtiment, mais aussi en réponse aux contraintes réglementaires, grâce à la possibilité d'exporter hors plan d'épandage la fraction solide, riche en phosphore et en azote, après transformation.

En 2011 et 2012, la CRAB a suivi 3 élevages (station expérimentale de Guernévez [29], la SARL de Lesnée [Guéhenno, 56] et l'EARL de Kernivinen [Prat, 22]), dans lesquels elle a procédé à divers essais 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). Ces essais ont permis de définir les conditions de transformation optimales du solide de raclage par 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 (tableau 29).

Site	Type PRO	Analyse chimique	Analyse micro-biologique	Analyse stabilité du C	Analyse de minéralisation de l'N
Guernévez 1	Solide frais	1			
Guernévez 1	Composté	6	3	3	3
Guéhenno 1	Composté	1	1	1	1
Guéhenno 2	Solide frais	2			
Guéhenno 2	Composté	3	1	1	1
Guéhenno 3	Solide frais	1			
Guéhenno 3	Composté	2	1	1	1
Prat	Solide frais	1			
Prat	Composté	2	1	1	1

**Tableau 29** : Type et nombre d'analyses pratiquées.

Le suivi a porté sur des quantifications de flux de déjections en cours de transformation (réalisation de bilan de minéraux) et des analyses chimiques sur les fèces avant et après compostage. Les phases solides fraîches ont été prises à la sortie du bâtiment. Les phases solides évoluées ont été prélevées dans des tas à plusieurs dates de compostage et stockage. L'analyse chimique a porté sur MS, MO, N-total, N-NH<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Cu et Zn selon les normes en vigueur. Les analyses microbiologiques ont porté sur salmonelles, œufs d'Helminthes, Escherichia Coli et Entérocoques. L'analyse de stabilité du C répond à la **Norme XP U44-162** et a porté en plus sur le CaCO<sub>3</sub>. L'analyse d'incubation de l'azote répond à la **Norme XP U44-163**.

La synthèse des essais et la diffusion des résultats ont été réalisées sur 2013. Une fiche technique a été élaborée pour ce nouveau type de produit issu du compostage.

#### Principaux résultats :

Après compostage et séchage, le compost de fèces de porc présente une teneur en éléments fertilisants (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O) telle qu'il peut être classé en « engrais NP issus de lisier NFU 42 001 » (sur produit brut, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > 3 % et N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O > 7 %), à condition que la MS soit supérieure à 55 % (tableau 30). 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 stoker 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.

en % MB	MS	MO	C org	C/N	N total	NH3	N org	P2O5	K2O	Cuivre	Zinc
<b>Moyenne</b>	<b>57.0</b>	<b>43.0</b>	<b>21.6</b>	<b>10.8</b>	<b>2.06</b>	<b>0.22</b>	<b>1.8</b>	<b>3.1</b>	<b>1.9</b>	<b>166</b>	<b>820</b>
<b>Coef de var</b>	<b>15%</b>	<b>16%</b>	<b>17%</b>	<b>16%</b>	<b>11%</b>	<b>71%</b>	<b>13%</b>	<b>17%</b>	<b>11%</b>	<b>35%</b>	<b>41%</b>
<b>mg/kg MS</b>											

**Tableau 30** : Composition du compost de fèces de porc.

Le compostage fait baisser la teneur en eau, ce qui augmente les teneurs en divers éléments entre la phase fraîche et la phase compostée. L'indice de stabilité biologique de la matière organique (ISMO) du compost varie selon les lots entre 26 et 46 % de la MO. A cet égard, il est classable comme un fumier de bovin. Il évolue régulièrement dans le sol et décompose de 30 à 45 % de son carbone durant les 91 jours de l'incubation.

## Compost de fumier pailleux de truies gestantes

Cette étude, portant sur la caractérisation agronomique du compost de fumier pailleux de truies gestantes mises en groupe sur litière dans le cadre de la « réglementation bien-être »<sup>3</sup>, a été menée par la CRAB.

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.

En l'absence d'un nombre suffisant d'éleveurs se positionnant dans une optique d'exportation du fumier, la CRAB a décidé, en 2012, de mener 5 cycles de compostage sur sa station de Crécom (St Nicolas du Pélem, 22), où différents modes de logement des truies en groupe étaient en place depuis plusieurs années pour identifier leurs avantages et inconvénients. Une salle est équipée d'un distributeur automatique de concentrés, et deux salles de réfectoires-courette. 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.

Comme prévu dans le protocole, des prélèvements pour analyses chimiques ont été effectués à divers phases et des analyses de minéralisation de l'azote ont été réalisées sur le produit composté (tableau 31).

Site	Type PRO	Analyse chimique	Analyse micro-biologique	Analyse stabilité du C	Analyse de minéralisation de l'N
Crécom 1	Solide frais	1	1		
Crécom 1	Composté	2	1	1	1
Crécom 2	Solide frais	1	1		
Crécom 2	Composté	2	1	1	1
Crécom 3	Solide frais	1	1		
Crécom 3	Composté	2	1	1	1
Crécom 4	Solide frais	1	1		
Crécom 4	Composté	2	1	1	1
Crécom 5	Solide frais	1	1		
Crécom 5	Composté	3	1	1	1

**Tableau 31** : Type et nombre d'analyses pratiquées sur le compost de fumier de truie.

Comme pour le produit précédent, l'analyse chimique a porté sur MS, MO, N-total, N-NH<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Cu et Zn selon les normes en vigueur. Les analyses microbiologiques ont porté sur salmonelles, œufs d'Helminthes, Escherichia Coli et Entérocoques. L'analyse de stabilité du C répond à la **Norme XP U44-162** et a porté en plus sur le CaCO<sub>3</sub>. L'analyse d'incubation de l'azote répond à la **Norme XP U44-163**.

Le fumier frais a été prélevé dans la salle des gestantes, tandis que les phases solides évoluées ont été prélevées dans des tas à plusieurs dates de compostage et stockage.

### Principaux résultats :

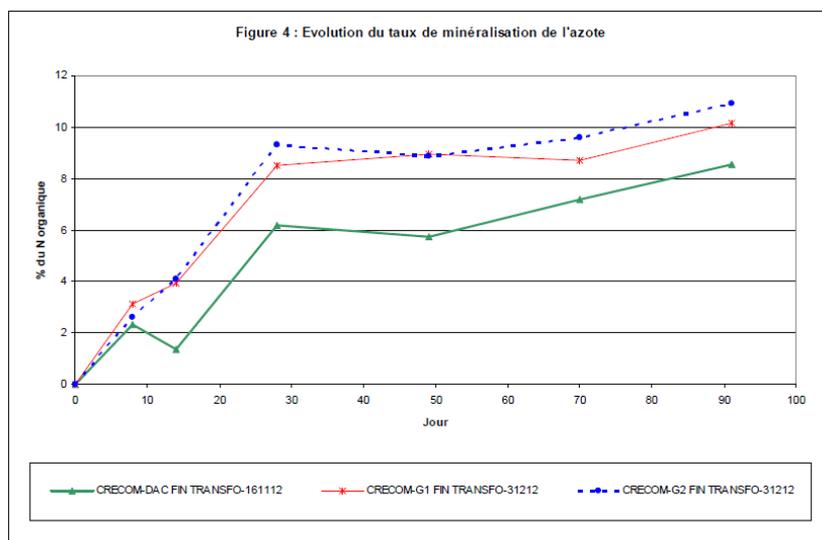
Ce PRO est relativement proche des références « fumier à base de paille composté » (IFIP, 2005). Il s'en distingue par un taux de MO plus élevé, une teneur en N total un peu plus élevée et surtout par une teneur plus faible en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cu et Zn. Les analyses microbiologiques montrent 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'azote organique au bout de 91 jours). L'N-NH<sub>4</sub> du PRO doit être pris en compte pour apprécier l'effet fertilisant (0,2 kg N/t).

<sup>3</sup> 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<sup>er</sup> janvier 2013.

		MS	MO	C org	Rapport C/N	N total	N - NH3	N org	P2O5	K2O	Cuivre	Zinc
		%	%	%		%	%	%	%	%	mg/kgMS	mg/kgMS
Fumier frais	moyenne	25.58	22.52		22.74	0.51	0.05	0.48	0.37	0.69	31.53	199.87
	écart type	1.38	1.28		3.52	0.12	0.04	0.09	0.14	0.30	12.70	79.91
	coefficient de variation	5.4%	5.7%		15.5%	22.9%	78.6%	19.8%	37.3%	42.8%	40.3%	40.0%
Fumier en cours de transformation	moyenne	39.58	29.42		11.04	1.31	0.04	1.25	1.06	2.08	59.12	366.85
	écart type	11.55	10.27		1.58	0.30	0.01	0.29	0.39	0.51	9.16	62.61
	coefficient de variation	29.2%	34.9%		14.3%	22.6%	20.2%	23.6%	37.0%	24.4%	15.5%	17.1%
Fumier en fin de transformation	moyenne	43.13	33.23	17.62	10.87	1.53	0.02	1.43	1.25	2.40	63.36	398.53
	écart type	9.46	7.87	4.32	1.27	0.23	0.01	0.22	0.48	0.53	11.81	77.70
	coefficient de variation	21.9%	23.7%	24.5%	11.7%	15.1%	28.7%	15.2%	38.2%	22.0%	18.6%	19.5%

**Tableau 32** : caractéristiques analytiques des fumiers de truie sur MB.

Les courbes de minéralisation de l'azote organique (figure 23) sont légèrement différentes selon les produits choisis (distributeur automatique de concentrés ou réfectoires-courette), mais sans grandes différences de comportement (Distributeur Automatique de Concentrés minéralise un peu moins d'azote car il y a un peu plus de paille par truie, et parce que le curage est moins fréquent que pour le mode de logement en réfectoires-courette).



**Figure 23** : Courbe de minéralisation de l'N organique en conditions contrôlées (DAC = Distributeur Automatique de Concentrés ; G1 = Salle 1 ; G2 = Salle 2).

## Fumier de volaille composté avec un activateur

Cette étude, qui devait initialement porter sur les fumiers issus des nouvelles litières pour les volailles de chair à base de miscanthus ou de colza, a été menée par la CRAB et l'ITAVI. Ce sous-volet visait à fournir une suite complémentaire 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®). Il visait également à connaître les évolutions du fumier en cours de stockage et à évaluer la possibilité de le composter. Il était enfin prévu d'éventuellement travailler sur l'intérêt de la séparation de la litière avec les fientes suivie de la granulation des fientes.

L'action ne s'est pas réalisée comme prévu pour plusieurs raisons :

- Dès le début de l'action, il est apparu que les éleveurs n'étaient que peu ou pas intéressés par la mise en place d'essais sur les litières de paille de miscanthus ou colza, ce qui a remis en cause la possibilité d'entamer des expérimentations.
- Après contact avec des industriels, la séparation de phase entre la paille et la fiente s'est avérée techniquement difficile à mettre au point, hors de portée financièrement du présent projet.
- De ce fait, au second semestre 2011, le projet s'est recentré sur une suite au projet « Litières » en particulier sur le projet d'acquies de la référence de la valeur agronomique des litières de pailles de céréale, compostées et traitées au préalable avec un activateur de compostage. En effet, ce projet CASDAR « litières » avait mis en avant un avantage de ces activateurs sur le piégeage de l' $\text{NH}_3$ . Une incidence sur la qualité des fumiers et composts était donc à prévoir. Un protocole nouveau a été écrit, validé par le comité de pilotage, puis plusieurs élevages dans l'ouest ont été démarchés pour mettre en place ces suivis.

- d) Un seul éleveur (Jean-Paul CHUPIN, producteur de poulets exports [30/35 j] à La Bisière, Torfou 49) s'est porté volontaire pour mettre en place des suivis, en juin 2012. Une première bande a été traitée selon le protocole, et de premiers prélèvements d'échantillons ont été effectués (huit analyses agronomiques, deux analyses de composition biochimique, deux analyses d'incubation du C et du N, et deux analyses de microorganismes pathogènes) et l'interprétation des quelques analyses réalisées a été faite.

Malheureusement, les difficultés de la filière du poulet export (Doux) ont mis fin à ces essais chez ce producteur dès l'automne 2012.

L'essai a débuté en juin 2012. L'un des bâtiments a été traité avec du Bactériolit® Italie, l'autre n'a pas été traité (T). Du fait d'une erreur humaine, la dose de Bactériolit® apporté a été trois fois la dose prescrite par le fabricant SOBAC (0,3 kg/m<sup>2</sup> au lieu de 0,1 kg/m<sup>2</sup>). Au sortir des poulets, un apport d'eau a été réalisé sur le fumier selon les pratiques habituelles. Seul le tas témoin a été retourné durant la phase de compostage. Le tas traité présentait un état d'évolution suffisant pour ne pas être retourné.

Le 1<sup>er</sup> jour du compostage, deux échantillons ont été prélevés dans le lot E (J0 E1 et J0 E2) et deux échantillons dans le lot T (J0 T1 et J0 T2) ; le poids des tas était à ce jour respectivement de : 44,18 t et 16,41 t.

Après 84 jours de compostage (avec un retournement pour T et sans retournement pour E), 4 échantillons ont été prélevés dans les deux tas qui sont restés bien identifiés (J84 E1 et J84 E2, J84 T1 et J84 T2) ; le poids de ces tas en fin de compostage était respectivement de : 27 t et 10 t.

La perte de poids est donc la même dans les deux cas (39 % en 84 jours).

Du fait des difficultés du groupe DOUX durant l'automne 2012 qui ont perturbé l'élevage, cet essai, qui devait se répéter 3 à 4 fois sur le même principe pour avoir des résultats statistiquement exploitables, s'est arrêté.

#### Principaux résultats des analyses :

g/100 g MB	MS	MO	C/N	N tot	N-NH4	N Urée	P2O5	K2O	CaO	MgO
JO T1	59.7	47.7	10	2.2	0.28	0.03	1.5	1.8	1.8	0.66
JO T2	60.7	47.3	11.5	2	0.28	0.01	1.5	1.8	1.9	0.63
JO E1	57.6	42.8	13.3	1.6	0.15	0.02	1.2	1.7	1.8	0.61
JO E2	61.4	49.3	12.7	1.9	0.27	0.01	1.3	1.8	1.8	0.6
Moyenne	59.85	46.78	11.88	1.93	0.25	0.02	1.38	1.78	1.83	0.63
Ecart Type	1.65	2.79	1.46	0.25	0.06	0.01	0.15	0.05	0.05	0.03
Coef variation	3%	6%	12%	13%	26%	55%	11%	3%	3%	4%
J84 T1	66.6	57.4	10.3	2.8	0.62	0.03	2	2.5	2.2	0.85
J84 T2	67.7	53.7	9.3	2.9	0.69	0.04	2.2	2.6	2.4	0.94
J84 E1	60.6	49.8	10.1	2.5	0.57	0.01	1.8	2.1	2.4	0.84
J84 E2	66.6	53.1	13.9	1.9	0.32	0.01	1.2	1.8	7	0.59

Tableau 33 : Résultats des analyses agronomiques (les valeurs figurant dans une case jaune peuvent être considérées comme peu probables ou aberrantes).

	ISB (% MO)	Tr (% MO)	coef miné 3 jours
J84 T2	19.0%	33.4%	19.4%
J84 E2	24.0%	42.1%	14.5%

Tableau 34 : Résultat des analyses de stabilité biochimique.

	Spores clostri.	Enté. fecaux	Salmonelle	Œuf helminthe	E Coli	Clost. Perf.
J84 T2	< 10/g	2398 npp/g	abs dans 25g	abs dans 1.5g	<100/g	<10/g
J84 E2	< 10/g	258 npp/g	abs dans 25g	abs dans 1.5g	<100/g	<10/g

Tableau 35 : Résultat des analyses microbiologiques.

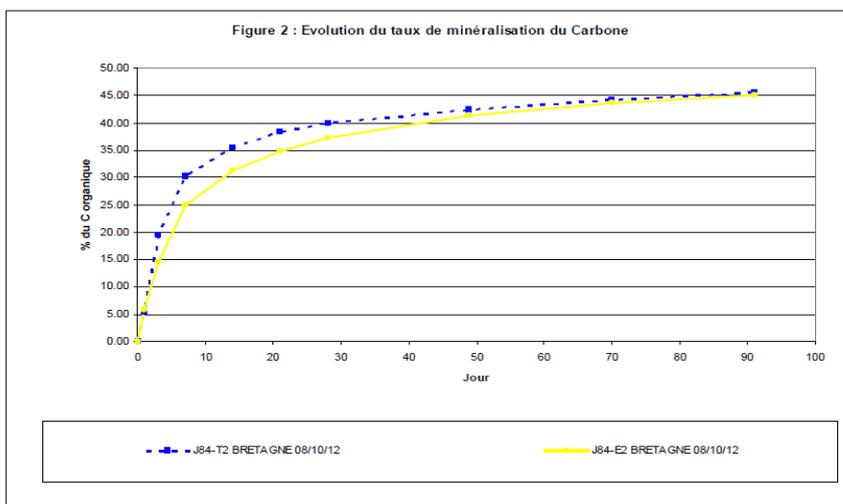


Figure 24 : Minéralisation du carbone en conditions contrôlées.

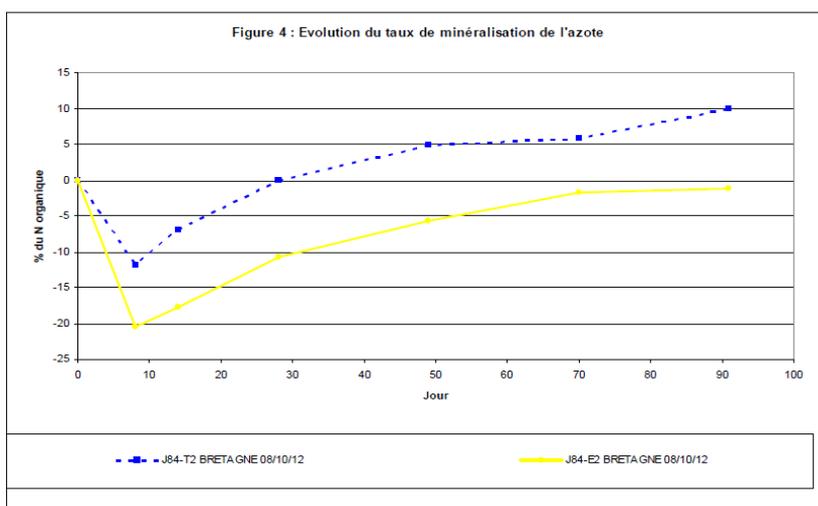


Figure 25 : Minéralisation de l'azote en conditions contrôlées.

L'interprétation de ces quelques analyses a été faite. Au vu de ces premiers résultats, du fait de l'absence de répétitions, il est difficile de faire émerger une tendance, mise à part une différence, qui reste à confirmer, dans les analyses de stabilité biochimique et d'incubation. Le produit traité avec Bactériolit® (J84 E2) semble être plus composté que le produit sans cet activateur de compostage (J84 T2). Cela s'observe en comparant les analyses de stabilité biologique (Tableau 34), mais aussi en observant la courbe de minéralisation du carbone (Figure 24). Est-ce ce compostage supplémentaire dans l'échantillon de type Italie qui a permis de descendre le taux d'entérocoques fécaux ? Une seule analyse ne permet pas de conclure.

Les courbes de minéralisation de l'azote (Figure 25) montrent que le produit traité avec Bactériolit® (J84 E2) réorganise de l'azote tout le long des 91 jours d'incubation. Il n'a donc d'effet fertilisant que par sa fraction d' $N-NH_4$  (3 kg/t pour E). Le produit J84 T2 re-largue de l'azote profitable aux cultures (sa fraction  $N-NH_4$ , à 6 kg/t, est à rajouter à l'effet fertilisant de l'azote organique) après une phase de réorganisation de 30 jours d'incubation. Ce comportement azoté est cohérent avec les autres observations sur le degré d'évolution du carbone.

En définitive, l'interprétation de ces quelques analyses 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 et répond aux critères de la norme NFU-44 051 des amendements organiques, sans amélioration significative par rapport à un compost standard. Des répétitions seraient néanmoins nécessaires pour confirmer ces conclusions.

### Digestats bruts de méthanisation

Cette étude, portant sur la caractérisation agronomique des digestats bruts de méthanisation, a été menée par la CRAB et la CA du Loiret.

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 de sélectionner 8 digestats représentatifs des principales pratiques d'élevages et d'approcher leur valeur agronomique par caractérisation *au laboratoire*. La CA du Loiret avait débuté le travail en 2010 par un inventaire des unités de méthanisation « agricole » installées et en service, en vue d'élaborer une première typologie des digestats. Mais ce travail s'est avéré fastidieux et l'accessibilité aux sites parfois difficile dans certains départements pour les agents de Chambre d'Agriculture missionnés. En outre, l'ADEME ayant lancé en 2010 une étude sur la caractérisation en laboratoire des digestats (dont RITTMO est le maître d'œuvre), cette approche n'était plus justifiée.

Ainsi en janvier 2011, le comité de pilotage a décidé de réorienter cette sous-action 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). La caractérisation au champ étant déjà prévue début 2010 par les départements ou régions concernés, principalement sur financements régionaux, la mise en place concrète des essais n'a pas été du ressort financier national du Casdar (sauf Loiret 2012). Des financements déconcentrés (Chambres d'Agriculture, Conseil Régional du Centre, ADEME Bretagne...) ont été à l'origine des projets. La contribution du Casdar a essentiellement permis la mise en commun des protocoles et le financement d'une partie du temps de travail de l'essai du Loiret en 2012.

Dès 2010, l'action s'est donc recentrée sur l'harmonisation des protocoles communs à mettre en œuvre en 2010, 2011 et 2012 sur les divers sites. Cette sous-action a consisté à mettre en place une concertation entre les divers acteurs des travaux de recherche (en lien également avec les partenaires du projet Casdar/ADEME « Réseau PRO ») pour obtenir un coefficient équivalence de l'azote au champ (ou un Coefficient Apparent d'Utilisation : CAU) et diffuser les données. Cette concertation a débuté avec plusieurs chambres d'agriculture, mais elle s'est finalisée essentiellement entre la CRAB et la CA du Loiret. Les autres chambres partenaires n'ont pas pu mettre en place les essais prévus pour diverses raisons internes.

Il était également prévu de réaliser des essais voire des expertises d'épandabilité sur le digestat brut. La demande initialement attendue des professionnels ne s'est pas concrétisée (cf. volet 2.2).

#### **Les sites et essais suivants ont été retenus comme exploitables :**

##### En Bretagne : Chambre Régionale d'Agriculture

- 2 essais sur RGI (2010 et 2011)
- 1 essai sur blé (2011)
- 1 essai sur maïs (2011)
- 1 opération de comparaison en grande parcelle sans répétition sur blé (2012)

##### Dans le Loiret : Chambre Départementale d'Agriculture

- 1 essai sur maïs (2011)
- 2 essais sur blé (2011 et 2012)
- 1 essai sur colza (2012) (au semis et ouverture du bilan)

#### **Matériel et méthodes**

Les descriptifs des essais réalisés sont disponibles sur simple demande aux partenaires cités en référence.

Les essais en Bretagne se sont déroulés sur des placettes de 30 à 50 m<sup>2</sup> avec 3 répétitions (sauf l'essai démonstratif de 2012) sur 3 sites différents.

- Mise en place d'une courbe de réponse à l'azote avec des doses d'azote minéral apporté qui varient en fonction des cultures de 0 (témoins sans azote) à 150 kgN/ha avec des paliers de 40 ou 50 kg N/ha selon les cultures.
- Apport du digestat à l'arrosoir pour « imiter l'apport au pendillard ». Une comparaison avec du lisier de porc a été réalisée dans 3 essais sur 4. Un essai a été réalisé avec une approche d'injection. Une démonstration s'est faite avec une comparaison avec du fumier de volailles.
- Les doses d'apport des PRO ont été calculées pour être légèrement sous le point optimum de la courbe de réponse à l'azote.
- Les récoltes ont été réalisées soit manuellement (RGI, maïs) soit avec des moissonneuses spécialisées pour micro-parcelles (blé).

- L'essai démonstratif sur blé en grande parcelle en 2012 a permis de comparer le digestat au fumier de volaille et à l'ammonitrate.

Les essais dans le Loiret avec courbe de réponse à l'azote ont été réalisés chez le même producteur (GAEC Beet)

- Les doses de digestat en 2011 et 2012 ont été celles de la pratique de l'agriculteur et l'apport s'est réalisé « à la palette » en bandes. Chaque objet (doses de digestat et références minérales) a été conduit en placettes de 75 à 100 m<sup>2</sup> avec 3 répétitions.
- En 2012, les doses apportées ont été calculées au préalable selon le Plan Prévisionnel de Fumure avec une estimation forfaitaire du poste Mh (fournitures du sol).

Les Keq et CAU ont été calculés sur de l'azote absorbé par les parties aériennes.

CAU pro = (N ab culture fertilisée pro – N ab culture témoin 0N)/dose N apporté PRO

Keq soit = CAU pro / CAU miné dose approachante soit Keq = pour une même quantité d'azote absorbé par la culture : Napporté miné/Napporté PRO

### **Principaux résultats :**

Sur RGI 2010 Bretagne : Apport mi-juin au pendillard après une première coupe de foin.

- Keq avec une coupe de foin : digestat 27 %, lisier de porc charcutier : 22 % mais avec une variabilité inter-bloc de plus de 20 %.
- CAU du digestat = 17 % et CAU du lisier = 14 %
- Le reliquat d'azote en fin d'essai ne fait pas apparaître de grandes différences entre les diverses modalités.
- (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 70 % environ)

Sur RGI 2011 Bretagne : Apport mi-mars au équivalent pendillard.

- Keq de 55 % sur l'azote absorbé pour la 1<sup>ère</sup> coupe (pas de différences entre les modalités pour les deuxièmes coupes) mais avec des variabilités inter-bloc de près de 40 %.
- CAU du digestat = 45 %
- Le reliquat d'azote en fin d'essai ne fait pas apparaître de grandes différences entre les diverses modalités.
- (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 85 % environ)

Sur blé (2011 et 2012) : apport début mars à l'équivalent-pendillard en Bretagne et à la palette en bandes dans le Loiret.

En Bretagne (2011) :

- Keq de 66 % sur l'azote absorbé par le grain avec du digestat et du lisier de porc charcutier, mais avec des variabilités inter-bloc de près de 40 %.
- CAU du lisier = 66 %
- Le reliquat d'azote en fin d'essai ne fait pas apparaître de grandes différences entre les diverses modalités
- (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 85 % environ)

Dans le Loiret (2011) : Keq de 20 % environ mais avec des doses apportées à la palette au-dessus du palier de progression des rendements. Cette donnée ne peut être retenue (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 85 % environ).

En Bretagne (2012) : Un essai démonstratif en grandes parcelles avec apport au pendillard fait ressortir des Keq de 45 % pour le fumier de volaille et 65 % pour le digestat (références : fumier de volailles 45 %, lisier de porc 60 %).

Dans le Loiret (2012) : apport par rampe à buses miroirs mais sous conditions humides avec des placettes et une courbe de réponse à l'azote ; CAU digestat de 5 % environ et Keq (CAU pro/CAU miné) d'environ 10 %. Comme les doses apportées sont au-dessus du palier de progression des rendements, cette donnée ne peut être retenue (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 95 % environ).

Sur maïs (2011) : apport 1<sup>er</sup> mai au équivalent pendillard et équivalent injection. Semis le soir après l'apport.

En Bretagne (2011) : Digestat apport de surface : CAU de 36 %, digestat injecté : CAU de 72 % (lisier de porc de surface : CAU de 54 %). Mais avec des variabilités entre les blocs très importantes principalement pour l'injection.

Les Keq (CAU pro/CAU miné) sont de 51 % digestat de surface, 100 % pour le digestat injecté et 77 % pour le lisier de porc de surface (références : lisier de porc = 70 %).

(digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 90 % environ)

Dans le Loiret (2011) : le Keq observé en bandes a été d'environ 20 % mais avec des doses apportées à la palette au-dessus du palier de progression des rendements. Cette donnée ne peut donc être retenue (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 85 % environ).

Sur Colza (Loiret 2012) : apport au semis et au printemps de digestat en se basant sur l'azote absorbé par le grain. CAU de 48 % environ pour le digestat avec un apport au semis et 46 % avec un apport en fin d'hiver. Le Keq (CAU pro/CAU miné) est pour des apports de printemps de 86 % dans le cadre de cet essai (digestat N-NH<sub>4</sub>/N tot = 95 % environ).

	année	culture	date apport	méthode	CAU moy	Keq moy	observations
b	2010	RGI	juin	pendillard	17%	27%	2ème coupe
b	2011	RGI	mars	pendillard	45%	55%	1er coupe
b	2011	blé	mars	pendillard	66%	66%	
b	2012	blé	mars	pendillard	abs	65%	démonstration
L	2011	blé	mars	palette	13%	20%	dose > plafond
L	2012	blé	mars	palette	7%	10%	dose > plafond
b	2011	maïs	1er mai	pendillard	36%	51%	
b	2011	maïs	1er mai	injection	72%	100%	
L	2011	maïs	1er mai	palette	abs	24%	dose > plafond
L	2012	colza	fevrier	palette	46%	86%	

**Tableau 36** : Synthèse des résultats (b= Bretagne, L = Loiret).

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 NH<sub>3</sub> ?) ;
- 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<sub>3</sub> ?) ;
- les essais du Loiret sur colza en 2012 montrent un Keq élevé (86 %) pour l'apport de printemps.

#### o indicateurs de suivi

Agents	Thématique	2010	2011	2012	2013	Total
<b>CRAB</b>						<b>7,33</b>
B. Decoopman	Coordination + 4 thématiques	0,94	1,03	0,80	0,94	3,71
A. Loussouarn	Porcs	-	0,74	1,59	0,69	3,02
E. Dezat	Volailles	0,17	0,26	0,06	-	0,49
B. Le Bris	Porcs	0,11	-	-	-	0,11
<b>idele</b>						<b>2,855</b>
A. Charpiot	Bovins	0,325	1,075	0,465	0,525	2,39
E. Loringuer		-	-	-	0,465	0,465

Agents	Thématique	2010	2011	2012	2013	Total
<b>CA Loiret</b>						<b>0,69</b>
L. Lejars	Méthanisation	-	0,29	0,40	-	0,69
<b>ITAVI</b>						<b>0,18</b>
C. Aubert	Volailles	0,03	0,06	0,06	0,03	0,18
<b>IFIP</b>						<b>0,10</b>
P. Levasseur	Porcs	-	0,10	-	-	0,10
<b>TOTAL</b>		<b>1,465</b>	<b>3,575</b>	<b>2,585</b>	<b>2,65</b>	<b>11,155</b>

**Tableau 37** : Participation indicative des partenaires au volet 3 (en mois).

Les partenaires s'étant réparti le travail sur les divers produits, ils n'ont pas organisé de réunions inter-partenaires autres que les réunions du comité de pilotage et de l'équipe-projet qui leur permettaient de se coordonner.

### ○ indicateurs de réalisation

Ce projet a donc permis d'obtenir des premières références sur ces nouveaux PRO. Les caractérisations des deux phases issues du lisier de bovin tamisé (A), du compost de fèces de porcs issus du raclage en V (B) et du compost de fumier pailleux de truies gestantes (B-bis) ont fait l'objet de deux livrables par « nouveau produit » : un compte rendu général et une fiche technique. Nous disposons ainsi des 6 livrables suivants :

#### ● 3 comptes-rendus généraux sur :

- les taux de capture et donc l'intérêt des vis compacteuses et tamis vibrants comme outils de séparation de phases du lisier de bovin (11 p.) ;
- la conduite du compostage de fèces de porc issus du raclage en V, les taux de capture, la conformité à une norme et donc l'intérêt du raclage en V suivi de compostage : synthèse intitulée « Transformation par compostage de la fraction solide issue du raclage avec séparation de phases en porcherie d'engraissement » (11 p.) ;
- la conduite du compostage de fumier pailleux de truies gestantes, les taux de capture la conformité à une norme et donc l'intérêt de ce *process* : synthèse intitulée « Transformation par compostage de fumier de truies gestantes élevées en groupe » (8 p.).

#### ● 3 fiches techniques de présentation des PRO qui permettront l'intégration des données dans les modèles et outils d'aide à la décision (mesP@rcelles®, AzoFert®...), dans le système d'information du Réseau PRO et dans les listes des PRO qui vont être diffusées dans les prochains mois et années par le COMIFER :

- des PRO issus de la séparation de phase du lisier de bovin par tamisage incluant des compositions « PRO frais » et « PRO évolués » car les deux utilisations seront possibles (3 p.). Cette fiche technique intègre non seulement les 7 élevages cités dans cette étude, mais aussi des données d'autres élevages suivis par l'Institut de l'Élevage, ce qui renforce la robustesse de ces références ;
- du PRO issu du compostage de fèces de porcs issus de raclage en V (2 p.) ;
- du PRO issu du compostage de fumier pailleux de truies gestantes (2 p.).

Le compostage du solide issu du raclage en V de porcherie a également donné lieu à l'élaboration d'une fiche de préconisation d'une page destinée aux professionnels et deux publications (TechPORC, janvier-février 2013 ; Terra, janvier 2013). Toutes les fiches techniques rédigées dans le cadre de ce projet pourront être utilisées par l'Institut de l'élevage, l'IFIP, l'ITAVI ou les chambres d'Agriculture pour accompagner les producteurs dans une meilleure valorisation de leurs lisiers et fumiers. Leur diffusion vers un public d'agriculteur a débuté et va se poursuivre.

Compte-tenu de l'absence de répétition dans l'essai sur le fumier de volaille composté avec un activateur, les résultats de ce sous-volet ne peuvent, à ce stade, être diffusés.

L'approche des moyennes a permis d'amoindrir la difficulté liée à la grande diversité des situations étudiées qui fait que chaque exploitation est apparue comme un cas particulier, et de rendre diffusables les références obtenues, en prenant en compte la dispersion possible et donc le coefficient de variation souvent élevé.

Concernant les digestats bruts de méthanisation, les données recueillies dans le cadre de ce projet ont été immédiatement valorisées par diverses présentations en 2012 et 2013 (RMT Fertilisation et Environnement, Colloque Biogaz Europ Nantes 2013, groupe PRO du COMIFER 2012, Administrations régionales et GREN). Le GREN de Bretagne a choisi provisoirement de prendre le Keq du lisier de porc comme référence régionale. (cf. arrêté préfectoral GREN Bretagne juillet 2012) et le COMIFER a pris en compte ces références provisoires dans la nouvelle version du guide azote de mai 2013.

D'autre part, comme les données sur le digestat sont peu nombreuses, les chambres d'Agriculture des régions Centre, Pays de Loire et Bretagne se sont associées pour répondre à l'appel à projets DOSTE de l'ADEME (2013) sur la valeur agronomique des digestats, avec un protocole et fonctionnement acquis grâce à ce projet. Dès 2013, les CRA de Bretagne et des Pays de Loire ont mis en place (avec des aides des ADEME et CRA Bretagne et Pays de Loire) des essais au champ sur 6 sites et 3 types de cultures.

## IV - Volet 4 : valorisation et transfert

### ○ **rappel des objectifs attendus**

Ce volet avait pour double finalité (i) d'intégrer les références acquises dans les premiers volets sur la composition et l'épandabilité des effluents dans les outils opérationnels de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des risques environnementaux, et (ii) de faire la synthèse des connaissances acquises dans les volets précédents et d'en effectuer le transfert vers les professionnels.

Il était initialement envisagé d'élaborer une typologie qui serait, à terme, intégrée dans le paramétrage par défaut des outils, et qui permettrait de mieux renseigner les paramètres d'entrée relatifs aux effluents dans ces modèles. La typologie proposée devait résulter d'un compromis entre les paramètres et le niveau de précision requis par les outils (volet 1) et la nécessité de proposer une clé de reconnaissance simple des produits, pour que l'agriculteur puisse facilement identifier le produit qu'il utilise et ne commette pas d'erreur lors du remplissage des fiches de renseignements.

### ○ **méthodes de travail utilisées**

Comme précisé dans le volet 1, non seulement le test de la typologie n'a pas été réalisé en tant que tel (par manque de moyen et surtout de temps), mais aussi il n'a finalement plus été envisagé de produire une typologie d'effluents commune à tous les outils. En effet, des réflexions sur les typologies d'effluents ou plus généralement de produits résiduels organiques (PRO) initiés dans le cadre d'autres projets (ex. Casdar Réseau PRO) ont conduit à considérer qu'une typologie est relative à un usage et n'est pas pertinente « dans l'absolu ». On distinguera la **typologie** d'une **nomenclature**, qui constitue un inventaire structuré selon des caractéristiques communes. Aussi, une nomenclature peut être déclinée en plusieurs typologies pour des usages différents. Enfin, on distinguera également le terme **catalogue**, qui dans les OAD étudiés, désigne un ensemble de "fiches" associant à une entité, par exemple un "effluent d'élevage", une liste de valeurs relatives à des paramètres, normalisés du point de vue du logiciel utilisant le catalogue.

Seuls les trois outils portés par le RMT Fertilisation & Environnement (AzoFert®, RégiFert®, Syst'N®) et l'outil Planilis® d'Arvalis ont pu être pris en compte, le test de la typologie des effluents pour l'outil MesP@rcelles des chambres d'agriculture, ainsi que l'actualisation des modèles des flux environnementaux (MELODIE, MOLDAVI) portés par le RMT Elevages et Environnement, n'ayant pas pu être réalisés dans le cadre de ce projet comme initialement prévu, faute de personnel disponible pour y procéder.

En fin de projet à l'issue du second semestre 2013, le recul nécessaire à la synthèse des différents résultats n'était pas suffisant. Nous avons cependant initié une réflexion basée sur l'articulation des résultats des différents volets permettant d'améliorer la prise en compte des effluents dans les OAD (Figure 1).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce volet sont les suivants :

- synthèse des résultats des trois premiers volets en vue de leur intégration des acquis dans le paramétrage des trois outils portés par le RMT Fertilisation & Environnement (AzoFert®, RégiFert®, Syst'N®) et l'outil Planilis® d'Arvalis ;
- rédaction et diffusion de fiches techniques sur les différents effluents ;
- publication d'articles de transfert et organisation de réunions d'information et de démonstrations à destination des agriculteurs et éleveurs, des techniciens et des enseignants.

Ce transfert (fait ou à faire) prend différentes formes selon les thématiques envisagées :

- **Utilisation du modèle de prédiction de la composition des effluents**

Organisation de réunions d'information auprès de techniciens, enseignants et agriculteurs, rédaction d'articles dans la presse professionnelle.

- **Utilisation de la SPIR comme méthode de détermination rapide de la composition des effluents**

Organisation de démonstrations en élevages et à la station de Guernévez où se trouve un grand panel d'effluents (fumiers, composts, lisiers, digestats issus de méthanisation...), mise en ligne de vidéos sur l'utilisation de cette technique sur les sites Internet des RMT Fertilisation & Environnement et Elevages & Environnement.

- **Méthodes mises au point pour améliorer l'épandabilité et/ou la valeur agronomique du produit**

Rédaction et diffusion de fiches techniques « produits » sous forme informatique sur les sites Internet des différents partenaires (Synagri, RMT Fertilisation & Environnement, RMT Elevages & Environnement). Des exemplaires papiers seront diffusés auprès de techniciens, enseignants, éleveurs et utilisateurs d'effluents.

- **Sensibilisation des acteurs aux notions d'épandabilité**

Organisation de journées de démonstration sur les stations expérimentales des Chambres d'Agriculture partenaires, ainsi que des formations, valorisation technique et scientifique des travaux au travers d'articles.

- o **étapes et calendrier**

Ce volet s'est déroulé dans les derniers mois du projet en 2013, en deux phases correspondant à chacun de ses deux objectifs :

- Phase 1 : Amélioration de la prise en compte des effluents dans les outils de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des impacts environnementaux ;
- Phase 2 : Transfert des connaissances vers les professionnels.

- o **organisation mise en place, travail réalisé, moyens mobilisés**

#### **Sous-volet 4.1 : modalités de valorisation du projet dans les OAD**

La réflexion relative à l'amélioration de la prise en compte des effluents dans les outils de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des impacts environnementaux a été coordonnée par l'INRA de Rennes et le LDAR.

**La première étape** a consisté à déduire des résultats des analyses de sensibilités menées dans le volet 1, les améliorations requises pour mieux prendre en compte les effluents dans les 4 OAD testés.

#### **AzoFert®**

Pour l'outil AzoFert®, compte-tenu des relations mathématiques entre les postes étudiés et les variables explicatives, le calcul des pentes s'est avéré une bonne méthode d'approche de cette sensibilité. Cependant, le choix d'un jeu de données commun aux autres outils a limité les possibilités d'étude de la sensibilité d'AzoFert®.

Il en ressort néanmoins 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).

#### **Syst'N®**

Pour l'outil Syst'N®, une comparaison plus méthodique devrait être réalisée pour estimer le besoin de regrouper ou de diviser des types d'effluents. Pour le fumier de bovin par exemple (FB), les résultats montrent que les pertes d'azote lessivées sont peu différentes entre FB Pailleux et FB Stocké 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.

On observe également un manque concernant de nouveaux effluents, qui ont été étudiés dans le volet 3. Outre leurs caractéristiques, et de même que pour AzoFert®, des résultats d'incubation seront nécessaires pour paramétrer la cinétique de minéralisation.

En termes de précision requise pour les caractéristiques des effluents, l'analyse est trop incomplète pour conclure à ce sujet.

### RégiFert®

Pour l'outil RégiFert®, la constitution d'un catalogue d'effluents, avec leurs caractéristiques, semble finalement plus simple et suffisante pour les besoins d'un outil d'interprétation des résultats 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.

Les résultats du volet 1 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 ont encore à être précisés ;
- 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. Pour une imprécision acceptable de 5 unités  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  ou  $MgO$  pour la préconisation sur les 3 ans de la succession, l'incertitude admissible sur la teneur sur brut, pour des doses et teneur moyennes, serait de 3 à 8 % pour  $P_2O_5$ , 2 à 7 % pour  $K_2O$ , 10 à 28 % pour  $MgO$ .

### Planilis®

Dans l'outil Planilis®, pour le  $P_2O_5$  et  $K_2O$ , les teneurs des lisiers de porcs devraient être connues avec une plus grande précision que pour les autres produits. Pour le  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  et  $MgO$ , la teneur du fumier de bovins jeune est très variable et doit être connue avec une meilleure précision car elle entraîne des variations de doses conseillées très importantes. L'amélioration de la précision de la teneur pourrait passer par une nomenclature plus fine conduisant à un plus grand nombre de catégories de fumiers de bovins. Les autres produits (fientes, fumier de volailles et lisier de porcs) ne nécessitent donc pas le même investissement dans l'amélioration de la connaissance des teneurs, en particulier pour  $MgO$ .

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.

La mise en œuvre d'une typologie spécifique à Planilis® ne se justifie pas. Mais la recherche d'une bonne précision du conseil issu de Planilis® nécessite l'introduction des nouveaux produits épandables en agriculture et le découpage de certaines classes de produits (ex : fumier de bovins) en plusieurs classes limitant la variabilité de la teneur autour de la moyenne. Cet affinage de la nomenclature pourra se faire à l'aide du calculateur (volet 2.1) pour déterminer les facteurs de variation les plus pertinents à prendre en compte.

Dans l'ensemble, 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 à l'avenir afin d'analyser les liens entre les différents paramètres. La méthodologie mise au point au cours de ce projet peut aussi être utilisée pour l'analyse de l'impact des données météorologiques pour mieux comprendre l'effet du climat.

**La seconde étape** a consisté à dresser un bilan des contributions des différents volets du projet à l'amélioration de la prise en compte des effluents d'élevage dans les OAD, en se basant sur l'articulation des résultats des différents volets représentée en figure 26.

**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.

Le logiciel calcule mensuellement les flux de N-P-K ingéré, fixé (lait et viande) et excrété (+ Cu et Zn pour les porcins) en considérant, à l'échelle de l'exploitation agricole et à pas de temps annuel :

- les effectifs des diverses catégories d'animaux (évolution mensuelle),
- leur mode de logement (durée de présence/année et % de temps dans bâtiment),
- leur mode d'alimentation (évolution mensuelle),
- le(s) mode(s) de conduite des bandes d'animaux,

- le(s) mode(s) et durée de stockage des effluents,
- une zone climatique (station météo proche).

Ceci permet, en lien avec les flux de matière de litière, de calculer les flux (masses et caractéristiques) de divers effluents, dont l'état d'humidité va également dépendre du mode de logement des animaux, des usages de l'eau et du stockage des effluents.

Les données disponibles en sortie sont les suivantes :

- quantité d'effluents (m<sup>3</sup> ou T/an),
- quantité d'éléments transitant annuellement dans l'ouvrage de stockage (kg /an) : MS, MO, C, N<sub>TK</sub>, N-NH<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Cu, Zn,
- concentration des effluents à l'année :
  - . MS, MO et C en % du brut
  - . N<sub>TK</sub>, N-NH<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, en g/kg produit brut ; Cu, Zn en mg/kg MS

Il reste à utiliser le calculateur pour savoir quelles sont les variables les plus importantes à prendre en compte et susceptibles de jouer de façon sensible sur les résultats de sortie des OAD. Il sera intéressant pour le calculateur de définir les règles de variation des résultats, ce qui permettra d'identifier les critères à observer et à prendre en compte dans l'affinage de la typologie utilisée dans les outils. Cela permettra de faire la grille de lecture des effluents initialement prévue dans le projet. Le calculateur peut être utilisé dans une procédure d'analyse de sensibilité des sorties pour mettre en évidence des paramètres d'élevage pour lesquelles l'information devra être connue avec précision, car déterminante vis-à-vis des qualités des produits.

Enfin, le calculateur pourrait être utilisé pour l'aide au paramétrage des outils d'aide à la décision. Son utilisation nécessite donc une bonne connaissance des systèmes d'élevage en général. Il aurait tout son intérêt dans la phase de paramétrage (et maintenance) d'un OAD (azote ou analyse de terre), pour constituer le catalogue des effluents en traitant à l'avance les grandes catégories correspondant aux systèmes de production régionaux.

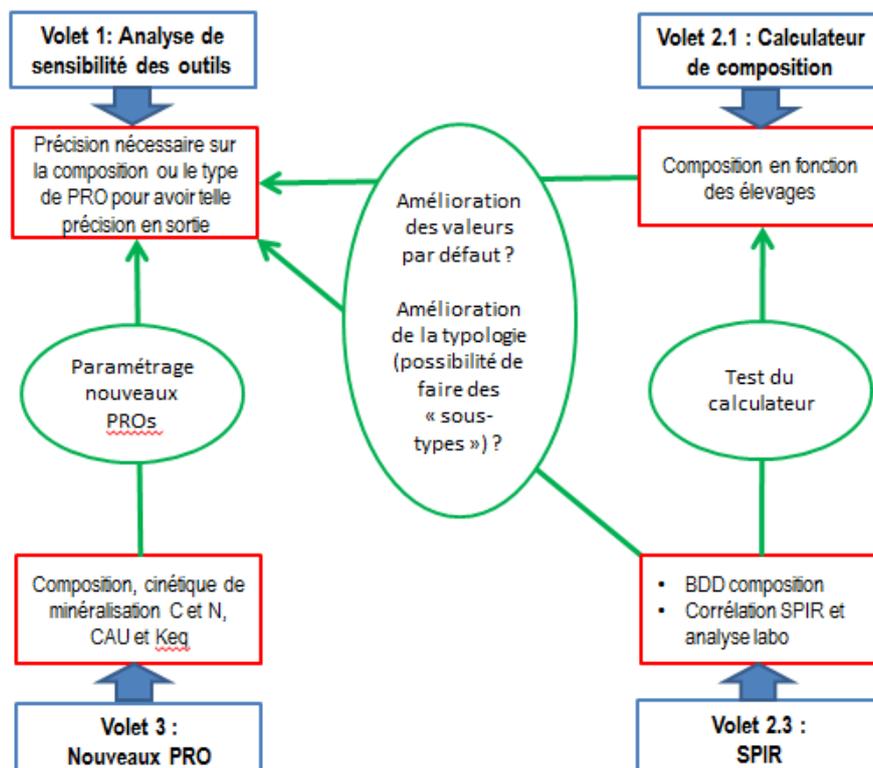


Figure 26 : Articulation entre les volets du projet.

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 porc et le fumier de bovin, et des teneurs en matière sèche, N et NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pour le fumier de volaille. 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.

En définitive, la SPIR peut être utilisée pour caractériser certains paramètres chimiques, et la précision a pu être calculée pour la MS et l'azote (N et N-NH<sub>4</sub>). L'exploitation des données sur les fumiers de bovins dont les spectres ont été collectés *in situ* est à poursuivre. Les dernières données analytiques, produites en fin de projet, n'ont pas encore pu être valorisées. Elles pourraient *a minima* servir à valider les équations de prédiction.

Il serait en outre nécessaire de caractériser les effluents conservés à l'issue du projet vis-à-vis des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote, ainsi que des compositions biochimiques. Une sélection spectrale pourrait aider à la sélection des échantillons « représentatifs » sur lesquels il serait intéressant de mesurer les cinétiques C et N minéral et profils biochimiques (analyses des fibres selon la méthode de Van Soest [normalisée AFNOR XPU44162]). Il serait également utile d'étudier d'autres PRO (autres que fumier de volailles, fumiers de bovins et lisiers de porcs).

Une base de données a été créée et contient la description des échantillons collectés. Il reste à y insérer les résultats des analyses chimiques et spectrales.

**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 porc 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, rassemblées dans des fiches-produits, pourront permettre d'alimenter le paramétrage des OAD.

Les premiers résultats acquis dans le cadre du projet, qui restent à valider, montrent qu'il existe des similitudes entre le comportement d'un digestat et celui d'un lisier de porc. Le travail de paramétrage dans les outils reste à faire sous réserve que les données de caractérisation des produits soient suffisantes. Il sera par ailleurs nécessaire de coupler ces résultats avec des essais au champ pour chacun des produits afin de valider les paramétrages.

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.

Agents	Catégorie	2013 (total)
<b>INRA</b>		<b>1,6</b>
V. Pamaudeau	IE 1	0,8
P. Denoroy	IR 1	0,5
J-M. Machet	IR	0,3
<b>LDAR</b>		<b>0,18</b>
N. Damay	Ingénieur	0,18
<b>Arvalis</b>		
R. Trochard	Ingénieur	p.m.
<b>TOTAL</b>		<b>1,78</b>

**Tableau 38** : Participation indicative des partenaires au sous-volet 4.1 (en mois).

Le travail sur le volet 4.1 a donné lieu à 2 réunions de travail en 2013.

#### **Sous-volet 4.2 : modalités de diffusion et transfert des résultats**

La rédaction de synthèses et fiches techniques et le transfert des connaissances vers les professionnels ont été coordonnés par l'ACTA et la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne. Les partenaires techniques associés étaient INRA Rennes, Institut de l'Élevage, IFIP, ITAVI, Irstea, CA du Loiret, CA de Vendée et CRA de Lorraine.

Les produits du projet sont les suivants :

- 7 descriptions de cas précis de contextes pédoclimatiques et systèmes de cultures associés en Alsace, Aquitaine, Bretagne et Picardie, aisément réutilisables pour d'autres tests d'outils ;
- 5 fiches de description détaillée d'outils de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des impacts environnementaux (AzoFert®, RégiFert®, Syst'N®, Planilis® et Azo-LIS®) ;

- 4 analyses de sensibilité d'outils de raisonnement de la fertilisation et d'évaluation des impacts environnementaux (AzoFert®, RégiFert®, Syst'N® et Planilis®) ;
- 1 calculateur « Composim » du volume et de la composition des effluents d'élevage de bovins, porcs et volailles, issu d'un modèle de prédiction mis au point à partir des données d'élevage ;
- 1 notice d'emploi et 1 guide méthodologique accompagnant Composim ;
- 1 document de synthèse portant sur la description des outils de caractérisation physique des effluents d'élevage liquides, pâteux et solides (25 p.) ;
- 1 document de synthèse portant sur la description des machines et des dispositifs d'épandage d'effluents d'élevage (35 p.) ;
- 1 document de synthèse portant sur les relations matériau/matériel d'épandage des effluents liquides, pâteux et solides (27 p., document de travail non diffusable) ;
- 1 rapport de stage sur « l'Epandabilité des Effluents d'Elevage » (48 p., document de travail non diffusable) ;
- une méthode de calibrage et de paramétrage d'équations de prédiction de la composition des effluents d'élevage à partir de mesures SPIR, susceptible d'être étendue ultérieurement à d'autres types de produits, dans le cadre d'autres projets ;
- des équations de prédiction de la composition (teneurs en MS, N et N-NH<sub>4</sub>) des 3 catégories de produits les plus représentatifs du gisement national (fumier de bovin, lisier de porc et surtout fumier de volaille) à partir de mesures SPIR, que ce soit à partir d'effluents passés en 'frais homogénéisés' sur des appareils de laboratoire, ou même à partir d'appareils portables directement sur le terrain ;
- 1 base de données de 200 échantillons rassemblant les caractéristiques des élevages les ayant produits et les compositions analytiques ;
- 1 base de données spectrales sur 3 catégories d'effluents d'élevage (fumier de bovin, lisier de porc et fumier de volaille) ;
- 1 compte-rendu général sur les taux de capture et l'intérêt des vis compacteuses et tamis vibrants comme outils de séparation de phases du lisier de bovin (11 p.) ;
- 1 synthèse « Transformation par compostage de la fraction solide issue du raclage avec séparation de phases en porcherie d'engraissement » sur la conduite du compostage de fèces de porc issus du raclage en V, les taux de capture, la conformité à une norme et l'intérêt du raclage en V suivi de compostage (11 p.) ;
- 1 synthèse « Transformation par compostage de fumier de truies gestantes élevées en groupe » sur la conduite du compostage de fumier pailleux de truies gestantes, les taux de capture la conformité à une norme et l'intérêt de ce *process* (8 p.) ;
- 1 fiche technique de présentation des PRO issus de la séparation de phase du lisier de bovin par tamisage, incluant des compositions « PRO frais » et « PRO évolués » (3 p.) ;
- 1 fiche technique de présentation du PRO issu du compostage de fèces de porcs issus de raclage en V (2 p.) ;
- 1 fiche technique de présentation du PRO issu du compostage de fumier pailleux de truies gestantes (2 p.) ;
- de nouvelles références en termes de composition sur les digestats bruts de méthanisation, qui restent à valider par essais au champ.

Ces résultats ont été (ou seront encore à l'avenir) diffusés et valorisés sur les plans technique, scientifique et pédagogique, à destination des professionnels de recherche, du développement et de l'enseignement agricole, des techniciens, des acteurs des filières, et des concepteurs, fournisseurs de données et utilisateurs des outils d'aide à la décision.

### (i) Valorisation technique

- Le présent rapport final et les divers livrables du projet seront diffusés au sein des RMT Fertilisation & Environnement et Elevages & Environnement, *via* leurs séminaires et/ou comités stratégiques/d'orientation ainsi que sur leurs sites Internet, des communications régulières sont prévues sur le projet et ses résultats à destination des organismes de la recherche, du développement et de l'enseignement agricole membres des RMT ;
- Journées techniques à destination des professionnels de recherche, du développement et de l'enseignement agricole, techniciens, acteurs des filières :
  - o Participation de l'INRA au Salon aux Champs (Salon National des CUMA) les 28 et 29 août 2013 ;
  - o Présentation et démonstration de l'utilisation de Composim (P. Levasseur, IFIP) lors du séminaire du RMT E&E du 8 octobre 2013 ;
  - o Diverses présentations orales des résultats du volet 3 sur les « nouveaux produits » en 2012 et 2013 (séminaires 2012 et 2013 du RMT fertilisation et environnement, Colloque Biogaz en septembre 2012 à Rennes, réunion du groupe PRO du COMIFER en octobre 2012, administrations régionales membres des GREN en 2012, Colloque Biogaz Europe à Nantes en mars 2013, Colloque Biogaz Europe à Saint Brieuc en janvier 2014) ;
  - o Nombreuses interventions des partenaires du projet aux Journées nationales des « Missions Déchets » de l'APCA en novembre 2013, notamment dans l'atelier de formation « Intégrer la fertilisation organique dans le conseil » : Sabine Houot (INRA), Vincent Tomis (Agro-tranfert Picardie), Alain Bouthier (Arvalis), Mathieu Valé (SAS Laboratoire), Pierre Havard (CRA Bretagne).
- Les résultats du volet 3 sur les « nouveaux produits » ont été immédiatement valorisés : le GREN de Bretagne a choisi provisoirement de retenir le Keq du lisier de porc comme référence régionale (cf. arrêté préfectoral GREN Bretagne juillet 2012) et le COMIFER a pris en compte ces références provisoires dans la nouvelle version de son guide azote de mai 2013 ;
- Revues professionnelles :
  - o la méthode de caractérisation par la SPIR a donné lieu à un article dans TechPORC n° 14, nov.-déc. 2013 (Thuriès *et al.*, 2013b) ;
  - o la fiche de préconisation sur le compostage du solide issu du raclage en V de porcherie a été publiée en janvier 2013 dans TechPORC n°9 et Terra (A. Loussouarn, CRAB) ;
  - o un article sur la production et les capacités de stockage des lisiers de porc a été publié dans TechPORC n°10, mars-avril 2013 (P. Levasseur, IFIP) ;
  - o un article intitulé « Evolution des rejets d'azote, phosphore, potassium, calcium, cuivre et zinc par les poulets, dindes et canards et impact sur les plans d'épandage » a été publié dans TeMA n°25, p 8-12 (C. Aubert *et al.*, ITAVI, 2013) ;
- Brochure intitulée « Estimation des rejets d'azote, phosphore, potassium, calcium, cuivre et zinc par les élevages avicoles » (64 pages, C. Aubert, ITAVI), validée en juin 2013 par le Comité NPC animé par les ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement ;
- A moyen terme, il est prévu de mettre à jour la brochure inter-instituts « Fertiliser avec les engrais de ferme » ;

### (ii) Valorisation scientifique

#### Communications orales

- o Thuriès *et al.*, 2012; Thuriès *et al.*, 2013a dans des congrès scientifiques internationaux (un orienté déchets organiques en 2013, un orienté méthodologie SPIR en 2012) ;
- o Communication sur le bilan environnemental et zootechnique du raclage en V et poster sur la capture du phosphore par raclage en V en porcherie d'engraissement (Journées de la Recherche Porcine, février 2014, A. Loussouarn, CRAB) ;

- Estimation des rejets d'azote, phosphore, potassium, calcium, cuivre et zinc par les poulets, dindes et canards ; Dixièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, La Rochelle, du 26 au 28 mars 2013, C. Aubert, ITAVI ;

Des articles sont prévus dans des revues scientifiques sur les avancées de la SPIR comme méthode de caractérisation de la composition des effluents.

### (iii) Valorisation pédagogique

Toutes les fiches techniques rédigées dans le cadre de ce projet pourront être utilisées pour accompagner les producteurs dans une meilleure valorisation de leurs lisiers et fumiers. Leur diffusion vers un public d'agriculteur a débuté et va se poursuivre.

Deux journées ont été consacrées en 2013 à la diffusion des travaux de recherche sur la SPIR auprès de la filière avicole de La Réunion.

Le document de synthèse sur les machines et dispositifs d'épandage est à vocation didactique et pédagogique.

Des formations de techniciens et d'agriculteurs pourront être organisées par les instituts techniques et les chambres d'agriculture sur la valeur fertilisante et amendante des produits organiques (listes de produits et compositions). Le calculateur Composim et/ou ses sorties pourront être utilisés au cours de ces formations.

Suite aux formations reçues fin 2013, la mission « déchets » de l'APCA et son réseau de diffusion nationale pourra valoriser les résultats du projet afin de promouvoir l'utilisation des produits organiques issus d'élevages par les agriculteurs non producteurs, les céréaliers notamment.

#### ○ exploitation et valorisation des résultats, de l'expérience acquise

- Les résultats de l'ensemble du projet vont être utilisés pour préciser la liste et la composition des produits insérée dans les outils de calcul de la fertilisation du RMT F&E et d'ARVALIS, utilisés par les conseillers (Chambre d'agricultures, coopérative, négoce, laboratoire) à destination des agriculteurs.
- Les CA du Centre, des Pays de Loire et de Bretagne ont monté, avec un protocole et fonctionnement acquis grâce au présent projet, un nouveau projet intitulé « VADIM » sur la valeur agronomique de l'azote des digestats de méthanisation, qui a été soumis et reçu à l'appel à projets DOSTE de l'ADEME. Dès 2013, les CA de Bretagne et des Pays de Loire ont mis en place (avec des aides des ADEME et CRA Bretagne et Pays de Loire) des essais au champ sur 6 sites et 3 types de cultures.
- Les exercices de validation du calculateur avec des jeux de données montrent qu'il y a des différences de résultats entre valeurs simulées par le calculateur et les analyses *in situ* pour des lisiers. A ce titre, le calculateur a une portée pédagogique. L'argumentaire de validation est à ce titre essentiel. Il permet de mieux comprendre les différences existantes et de démontrer un peu plus clairement l'importance de l'échantillonnage des effluents afin de disposer d'analyses représentatives.  
En pratique, de nombreux éleveurs dénoncent effectivement les « normes » CORPEN jugées trop élevées, non représentatives des situations d'élevage. Les analyses sur des échantillons de lisier prélevés *in situ* constituent la référence des éleveurs. Sur le terrain, les éleveurs emploient couramment le terme « azote réel » pour désigner les résultats de leurs propres valeurs d'analyses en opposition aux références de rejet administratives. Or les centaines d'analyses à notre disposition apparaissent clairement plus diluées que ce qu'elles devraient être. Les raisons de ces différences sont multifactorielles et difficiles à démontrer. L'existence d'un tel calculateur avec des formules ouvertes, contribue à les éclaircir en appui aux articles déjà rédigés sur le sujet.

#### ○ les transferts prévus

- Articles techniques et dans la presse professionnelle à publier en direction d'un public très large :
  - conseillers en environnement et en agronomie
  - éleveurs et agriculteurs

- Sous format papier et électronique en pdf de façon à être lus par toutes les catégories de professionnels agricoles.
- Rédaction d'un article dans TeMA (Techniques et Marchés Avicoles) sur l'utilisation de la SPIR pour caractériser les fumiers de volailles (prévu en Juin 2014).
- Des articles sont encore prévus dans TechPORC, Porc Magazine et/ou Réussir Porc, sur l'existence, l'utilisation, l'intérêt et les limites du calculateur Composim.

## V – Les perspectives

### ○ les points forts et les points faibles du projet

De façon générale, ce projet a été une bonne opportunité de faire collaborer instituts de recherche, instituts techniques, chambres d'agriculture et laboratoires d'analyses, et l'organisation du projet en 6 groupes de travail (correspondant aux volets 1, 3 et 4 et aux sous-volets 2.1, 2.2 et 2.3) a permis une bonne dynamique de travail au sein de chacun d'eux. En revanche, ce travail en groupes distincts a limité la capacité de chacun des partenaires à se situer dans la dynamique globale du projet.

Plus particulièrement, le projet a permis :

- de réaliser des avancées sur la connaissance des OAD, permises par une réflexion collective et des données mises en commun ; une réflexion méthodologique sur l'analyse de sensibilité simple et très orientée vers l'application ;
- de fédérer plusieurs partenaires sur le volet SPIR qui nécessite un grand nombre de données, notamment de développer une collaboration suivie sur les mesures spectrales entre les laboratoires du CIRAD, le LDAR, Arvalis et INRA SAS ;
- d'élaborer une base de données de produits (échantillothèque), une base de données sur des mesures SPIR et une base de données de composition des effluents ;
- d'approfondir le partenariat sur la question des effluents d'élevage notamment au sein des RMT F&E et E&E, et de monter un nouveau projet sur le "transfert au champ" des caractérisations de laboratoire.

En revanche, le projet présente les points faibles suivants :

- les 2 changements successifs de chef projet au sein de l'ACTA ont nui au respect des délais, à la cohésion des divers groupes de travail et au recul nécessaire à la synthèse finale des travaux ;
- le temps nécessaire à la réalisation de la plupart des travaux a été largement sous-estimé, notamment pour le volet 1, voire sur l'ensemble des volets ; le manque de maîtrise méthodologique au départ en est un facteur, de même que l'inadaptation des outils habituels de l'analyse de sensibilité pour des outils "fermés" du point de vue algorithmique (méthodologie de statisticiens, R, etc.) ;
- l'ampleur du travail de coordination nécessaire à l'organisation de la campagne de collecte des échantillons d'effluents pour le volet 2.3. a également été sous-estimée ;
- les questions liées aux propriétés des résultats, des bases constituées et de leur exploitation (éventuellement commerciale) n'ont pas été totalement réglées avant la fin du projet.

De façon spécifique pour le calculateur, on peut se réjouir de ses nombreux points forts :

- prise en main aisée de l'outil,
- multitudes de situations,
- facilement actualisable/modifiable,
- disponibilité d'Excel par chacun,
- 2 niveaux de difficulté d'accès/de précision.

Le calculateur présente néanmoins les points faibles suivants :

- impact perfectible des différentes techniques d'abreuvement et d'alimentation sur le taux de dilution des lisiers ;
- aspects climatiques perfectibles : même s'il est possible de renseigner sa propre pluviométrie, le caractère aléatoire de cette donnée constitue une source d'imprécision ;
- références peu fiables pour les fumiers et composts de truies ;
- effet complexe du compostage et des modalités de conduite de la litière, difficile à modéliser dans un tel calculateur ;

- incertitude sur le paramètre azote du fait de la part d'azote perdu par volatilisation, laquelle dépend des conditions d'élevage qui ne peuvent pas toutes être prises en considération dans l'outil.

- o **les difficultés rencontrées**

Sur les aspects généraux et organisationnels du projet et des partenariats :

- Le changement de chef projet a affaibli à 2 reprises la conduite du projet, la coordination des partenaires et des volets, le respect des échéances et la capacité de synthèse finale des résultats. En outre, il a probablement manqué, parmi les partenaires du projet, une personne assez compétente sur tous sujets pour assurer une animation coordonnée des divers aspects scientifiques (projet trop large ?).
- La distance géographique entre la France et l'Île de la Réunion n'a pas facilité les communications en direct ni les visites de laboratoires pour les échanges méthodologiques entre le Cirad et les autres partenaires, notamment au sein du volet 2.3. Grâce aux réunions téléphoniques régulières ou provoquées au besoin entre personnes ressources, les prises de décision n'ont néanmoins pas trop pâti de cette situation.
- Quelques mouvements de personnel au sein de la Chambre d'Agriculture de Bretagne et d'Irstea, tels que des départs à la retraite non remplacés, entraînant une perte de compétences spécifiques, ont partiellement impacté le projet. Il a par ailleurs été difficile de trouver des candidats pour les stages et CDD proposés, ce qui a occasionné des retards sur le calendrier.
- Ces contraintes de ressources humaines ayant entraîné un délai dans la restitution des analyses incompatible avec leur traitement par la stagiaire de Master II recherche en 2012 (initialement dédiée à ce travail), le Cirad (Laurent Thuriès) a dû réaliser les standardisations et les calibrages seul sur l'ensemble des spectres de tous les partenaires. A cause de cette désynchronisation, le temps investi a alors été largement supérieur à celui qui avait été prévu.
- Enfin, la synthèse et la diffusion des résultats, initialement censées concerner tous les partenaires en fin de projet, ont été réduites faute de recul dû au retard accusé par tous les volets, malgré la prolongation de 6 mois.

Sur les aspects techniques et scientifiques du projet :

- La méthode d'analyses par la SPIR nécessite un échantillonnage très précis, de même nature que pour des analyses chimiques, et sa transposition en appareil portable sur le terrain devrait pouvoir se réaliser. L'étude de faisabilité l'a démontré clairement pour les effluents de volaille. Il devrait en être de même pour les fumiers de bovin, même si la présente étude n'a pas pu aller jusqu'au résultat obtenu pour les effluents de volaille (temps et expérimentations non dimensionnés pour cela). Pour une transposition sur le terrain pour l'ensemble des effluents *via* un appareil portable, il faudrait s'investir dans un projet à la suite de ce projet CasDAR.
- Ce projet a mis en exergue toute la complexité d'interprétation de l'épandabilité des effluents et toute la difficulté liée au travail avec des effluents d'élevage en général et à la détermination de leur épandabilité en particulier. En effet, si des effluents comme les boues d'épuration sont issus d'un *process* qui permet de lisser certaines hétérogénéités, ce n'est pas le cas des effluents d'élevage qui présentent une hétérogénéité multiple : mécanique et biochimique, en fonction des pratiques agricoles, du lieu et des conditions de stockage, à l'échelle du tas, etc. Ainsi, même si de grandes tendances ont pu être établies, chaque effluent est un cas particulier dans sa catégorie. Tout cela rend souvent difficile la mise en œuvre d'études sur l'épandage des effluents organiques, études qui nécessitent (i) des volumes importants d'échantillons, (ii) un lourd travail de manutention, (iii) des essais au banc et sur le terrain (d'un coût non négligeable) et (iv) une approche statistique (synonyme de temps, main-d'œuvre et implication de la part des professionnels).
- Dans le volet 2.1 (élaboration du calculateur), il était prévu d'associer aux effluents une évaluation de leur « épandabilité » au travers d'indicateurs qui devaient être précisés, voire de désigner ou de hiérarchiser les matériels d'épandage les plus adaptés. Cette notion, essentielle puisqu'elle permet de choisir le matériel d'épandage le mieux adapté à une bonne valorisation agronomique de déjections, n'a finalement pas été intégrée dans le calculateur du fait que les critères d'épandabilité n'ont pu être suffisamment élaborés dans le cadre de ce projet, comme indiqué ci-dessus.

- Les grandes différences entre les systèmes d'élevage, et les modalités de calcul nettement distinctes pour chacune des trois filières animales, ont rendu difficiles l'harmonisation des approches et la conception d'un calculateur commun de composition des effluents. En particulier, l'approche « lisier » est différente de l'approche « fumier ». Ainsi, l'ergonomie de « Composim » peut encore être améliorée.
- Dans le volet 3 (caractérisation de « nouveaux produits »), la variabilité des données selon les exploitations s'est avérée plus forte que prévu.
  - **les suites envisagées**
- Poursuite des analyses de sensibilité sur l'outil AzoFert®.
- Poursuite de la réflexion sur la typologie des effluents et la modélisation de leur devenir dans le sol, dans le projet en cours Réseau PRO et le futur projet PROTypo en cours de montage, et plus généralement au sein des RMT Fertilisation & environnement et Elevages & environnement, notamment via le groupe de travail commun « valorisation des effluents d'élevages », en vue, à terme, de produire un document à destination des agriculteurs et techniciens sur la valorisation des effluents d'élevage en agriculture.
- Intégration des références acquises dans le paramétrage des trois outils portés par le RMT Fertilisation & Environnement (AzoFert®, RégiFert®, Syst'N®) et des outils d'Arvalis (Azolis®, Planilis®).
  - Pour AzoFert®, les résultats acquis seront intégrés directement dans l'outil pour caractériser les effluents d'élevage et conduire à une amélioration des conseils de fertilisation azotée, par une meilleure connaissance des quantités d'azote apportées par les effluents et disponibles pour la nutrition des cultures.
  - Dans le cas de Syst'N®, les résultats seront utilisés pour améliorer le paramétrage de l'outil et évaluer ses performances. Certains des résultats seront inclus dans une future version du manuel d'utilisation de l'outil. La réflexion sur la méthode d'analyse de sensibilité d'un outil pluriannuel sera remobilisée pour des analyses lors d'études ultérieures.
  - L'objectif était d'élaborer une typologie à intégrer, à terme, dans le paramétrage par défaut des outils, et qui permettra de mieux renseigner les paramètres d'entrée relatifs aux effluents dans ces modèles. La typologie proposée résultera d'un compromis entre les paramètres et le niveau de précision requis par les outils examinés dans le volet 1, et la nécessité de proposer une clé de reconnaissance simple des produits, pour que l'agriculteur puisse facilement identifier le produit qu'il utilise et ne commette pas d'erreur lors du remplissage des fiches de renseignements.
- Intégration des références acquises dans cahier des charges du "SIAT" (système d'interprétation des analyses de terre) en cours de montage au sein du RMT Fertilisation & environnement.
- Actualisation des modèles de simulation des flux environnementaux portés par le RMT Elevages & Environnement et les partenaires du projet (MELODIE, MOLDAVI).
- Amélioration des techniques d'échantillonnage sur le terrain en vue d'harmoniser les deux façons d'estimer la composition des lisiers (par calcul et par analyse *in situ*).
- Poursuite de l'amélioration de l'ergonomie et du paramétrage du calculateur Composim, éventuellement par programmation sous web, qui permet de prendre en compte plus de facteurs de variation qu'Excel, sans perte de convivialité et de simplicité. L'attrait des agents de développement pour un tel outil sera décisif.
- Poursuite du travail de paramétrage des équations de prédiction pour le volet SPIR ; transfert aux laboratoires d'analyses et à des prestataires de service de la méthodologie d'utilisation de la mesure SPIR pour prédire les teneurs en matière sèche, azote total et ammoniacal.
- Poursuite du travail sur les « nouveaux produits » en se concentrant sur un suivi des élevages ayant choisi de s'équiper du type d'investissement retenu comme le plus performant, afin de consolider les références. Sur ce volet, les travaux sur la valorisation de l'azote des digestats de méthanisation sont déjà entamés depuis fin 2013 par les chambres régionales d'agriculture de Bretagne et des Pays de Loire dans le cadre du projet VADIM soutenu financièrement par l'ADEME.

- Montage d'un nouveau projet se focalisant sur l'épandabilité des effluents et s'appuyant sur les acquis de ce projet, en vue, à terme, d'intégrer des paramètres et données d'épandabilité dans les OAD :
  - Exploration de la mise au point d'outils de terrain de caractérisation physique (mécanique) des effluents d'élevage, destinés à aider au réglage des machines et à l'usage des professionnels ;
  - Caractérisation (au bac et sur le terrain) des produits considérés comme « à problème » en matière de manipulation ;
  - Travaux statistiques en vue d'approcher la prédiction du comportement des effluents en fonction de leur composition ;
  - Etude des pratiques de « prétraitement » (ex. homogénéisation de cuve ou broyage), qui peuvent fortement améliorer la qualité de répartition de l'effluent au sol, en vue de préconisations auprès des professionnels ;
  - Réflexion sur la prise en compte du devenir des effluents d'élevage dans les pratiques d'élevage, compte tenu des liens démontrés ici entre les pratiques d'élevage et l'aptitude des effluents à l'épandage ;
  - Intégration de l'impact environnemental dans la réflexion sur l'épandabilité des effluents (certification environnementale des machines, étude des impacts, dégagements d'odeurs, etc.).
- Actualisation de la brochure « Fertiliser avec les engrais de ferme » ou nouveau document inter-instituts ?
- Communication scientifique et vulgarisation (revues techniques, Comifer...)
- Utilisation de la base de données d'effluents pour calibrer la mesure SPIR sur d'autres grandeurs analytiques (composition biochimique par exemple) et de nouvelles caractérisations (minéralisation CN en conditions contrôlées)
- Elargissement de la démarche à de nouveaux produits : digestats de méthanisation, composts, lisiers de bovins...
- Montage d'un nouveau projet « PROTypo » visant à élaborer une typologie des PRO par classes de comportement, opérationnelles pour le conseil en agriculture.

## Références bibliographiques

- Abiven S., 2004. Relations entre caractéristiques de matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale. Thèse de doctorat, INRA, Paris, France.
- Ait Aissa H., 2012. Améliorer la prévision de la composition des effluents d'élevage par l'utilisation d'une méthode innovante : la spectroscopie proche infrarouge. Master 2. Opex. Université Bretagne Ouest, Brest.
- ARVALIS, INRA, 2006. Produits résiduels organiques : dossier. Perspectives Agricoles N° 326, sept. 2006.
- Aubert C., Bouvarel I., Chevalier D., Dezat E., Ponchant P., Rousset N., Hassouna M., 2013. Evolution des rejets d'azote, phosphore, potassium, calcium, cuivre et zinc par les poulets, dindes et canards et impact sur les plans d'épandage. TeMA : techniques et marchés avicoles 25, 8-12.
- Barnes R.J., Dhanoa M.S., Lister S.J., 1989. Standard Normal Variate Transformation and De-trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra. *Applied Spectroscopy* 43, 772-777.
- 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.
- Baudez J-C., Dieudé-Fauvel E., Héritier P., 2007. Guide de caractérisation rhéologique des boues résiduelles à l'usage des professionnels de la R&D et du terrain.
- Bazot A., 2011. Caractérisation du potentiel agronomique des litières de volailles à la Réunion : intérêt de la spectroscopie proche infrarouge. Ingénieur ESA Purpan. ESA Purpan, Toulouse.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin B., 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. Editions Quæ.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.-M., Meynard J. M., Delecolle R., 1998. STICS: a Generic Model for the Simulation of Crops and their Water and Nitrogen Balances: I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- CORPEN, 2001. Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux bovins allaitants et aux bovins en croissance ou à l'engrais, issus des troupeaux allaitants et laitiers, et à leur système fourrager.
- CORPEN, 1999. Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux vaches laitières et à leur système fourrager : Influence de l'alimentation et du niveau de production.
- Decoopman B., 2006. Caractérisation de fertilisants organiques, CRAB.
- 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.
- Devaux J-F., Héritier P., 2007. Caractérisation des matériaux organiques. Cemagref
- 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 », 25 p.
- Dollé J-B. *et al.*, 2005. La gestion des fumiers mous. Collection Synthèse, Institut de l'Elevage, 30 p.
- Dubrulle P., Dupont A., Schoeser M., Villette C., Denoroy P., 2007. RegiFert, Manuel de l'Utilisateur, version 3.2. INRA, Paris, 304 p.
- Institut de l'élevage, ITAVI, ITP, ITCF, 2001. Fertiliser avec les engrais de ferme. 201 p.
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. Chapter 10: Emissions from livestock and manure management, 87 p.
- ITAVI, 2003. Caractérisation des fumiers, lisiers et fientes de volailles. Etude OFIVAL.
- Levasseur P., 2005. Composition des effluents porcins et de leurs coproduits de traitement. ITP, Paris.

- Levasseur P., Charles M., Le Bris B., Boulestreau A-L., Landrain P., Athanase N., 2007. Comparaison de méthodes d'estimation des rejets d'azote, de phosphore et de potassium en élevage de porc. Journées de la recherche porcine, 39, 1-6.
- Jeuffroy M.-H., Recous S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy* 10, 129-144.
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.-L., Lineres M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C, Houot S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60, 297-310.
- Leclerc B., 2001. Guide des matières organiques. ITAB, Coll. Guide Technique de l'ITAB, Paris, 2 tomes.
- 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.
- Malgeryd J., Paumard T., 2008. Etude des cinétiques de minéralisation nette de l'azote organique des produits résiduels organiques à court terme *in situ* et en conditions contrôlées. Arvalis-Institut du Végétal / ESA.
- Malgeryd J., Wetterberg C., 1996. Physical properties of solid and liquid manures and their effects on the performance of spreading machines. *J. Agric. Eng. Res.* 64(4), 289-298.
- Manneville V., Lequenue D., Le Gall A., Lucbert J., 2008. Evaluation du Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole : compte-rendu Institut de l'Elevage n° 190833012. Collection Résultats.
- 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.
- Rottatinti T., 2010. Caractérisation du potentiel agronomique des litières de volailles à la Réunion : intérêt de la spectroscopie proche infrarouge. DUT Génie biologique option Industries Alimentaires et Biologiques (IAB). Université de la Réunion, Saint Pierre de la Réunion.
- Rousseau A., 2008. Projet INCIVOL974 : Valorisation énergétique des litières de volaille par combustion. VCAT. Cirad-Avipôle.
- Savitzky A., Golay M.J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* 36, 1627-1639.
- Shenk J.S., Westerhaus M.O., 1991. Population Definition, Sample Selection, and Calibration Procedure for Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Crop Science* 31, 469-474.
- Sinnaeve G., Dardenne P., Agneessens R., Biston R., 1994. The Use of Near Infrared Spectroscopy for the Analysis of Fresh Grass Silage. *J. Near Infrared Spectrosc.* 2, 79-84.
- 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 », 35 p.
- 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.

## Liste des annexes

- Annexe 1 Fiches de description détaillées des outils
- Annexe 2 Description des contextes régionaux (fichier Excel)
- Annexe 3 Analyse de sensibilité d'AzoFert®
- Annexe 4 Analyse de sensibilité de Syst'N®
- Annexe 5 Analyse de sensibilité de Planilis®
- Annexe 6 Analyse de sensibilité de RégiFert®
- Annexe 7 Notice d'emploi et Guide méthodologique du calculateur Composim
- Annexe 8 Description des outils de caractérisation physique des effluents d'élevage liquides, pâteux et solides
- Annexe 9 Les épandeurs d'effluents d'élevage : Description des machines et des dispositifs d'épandage
- Annexe 10 Perspectives d'Irstea suite à ce projet
- Annexe 11 Amélioration de la prédiction de la composition des effluents d'élevage par Spectroscopie Proche Infrarouge (Hanane AITASSA, rapport de stage)
- Annexe 12 Epandabilité des effluents d'élevage (Yohann POCRAIN, rapport de stage)
- Annexe 13 Synthèse sur la séparation de phases du lisier de bovins
- Annexe 14 Synthèse sur le compostage de la fraction solide issue du raclage en V des fèces de porcs
- Annexe 15 Synthèse sur le compostage de fumier de truies gestantes élevées en groupe
- Annexe 16 Fiche sur les produits issus de la séparation de phase du lisier de bovin par tamisage incluant des compositions « PRO frais » et « PRO évolués »
- Annexe 17 Fiche sur le produit issu du compostage de fèces de porcs issus de raclage en V
- Annexe 18 Fiche sur le produit issu du compostage de fumier pailleux de truies gestantes

## **C – Compte rendu financier**

Les pièces à fournir sont les suivantes :

- compte de réalisation consolidé, de l'ensemble du projet, action par action, établi par le chef de file
- la liste des conventions avec montants, établie par le chef de file
- pour chaque partenaire recevant des financements CAS DAR (chef de file + chaque organisme tiers) :
  - o le compte de réalisation (signé du commissaire aux comptes ou de l'agent comptable)
  - o la méthode de calcul des charges indirectes (signé du commissaire aux comptes ou de l'agent comptable)
  - o la méthode de calcul des temps de travail (signé du président de l'organisme)
  - o liste des agents réalisateurs (avec mention du niveau de qualification : technicien supérieur, ingénieur, chercheur) présentant leur temps de travail par action (signé du président de l'organisme)

**Le compte rendu final doit être accompagné de l'avis du représentant de l'Etat auprès de l'organisme chef de file.**

---