

Réseau PRO :
Création d'un réseau d'essais au champ et d'un outil de mutualisation des données pour l'étude de la valeur agronomique et des impacts environnementaux des Produits Résiduaire Organiques recyclés en agriculture

Heurtaux M.¹, Michaud A.²

Avec la collaboration d'A. Bell^{1, 2}, S. Houot², S. Alexandre², A. Duparque³, B. Balloy⁴, A. Schaub⁵, R. Trochard⁶, A. Bouthier⁶, M. Buffet⁷, S. Guillouais⁸, F. Flénet⁹, M. Bravin¹⁰, B. Decoopman¹¹, V. Goldberg¹², O. Demarle¹³, J-Y. Cahurel¹⁴, A. Richard¹⁵, V. Parnaudeau¹⁶, B. Leclerc¹⁷, R. Duval¹⁸, N. Damay¹⁹, S. Sagot¹⁹, C. Le Roux¹⁹, M. Valé²⁰, N. Valentin²¹, D. Ollivier²², A-S. Lepeuple²³, A. Revallier²³, A. Piquet²⁴.

- 1 ACTA, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12
- 2 INRA – AgroParisTech, UMR EcoSys, route de la ferme, 78850 Thiverval-Grignon
- 3 Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 chaussée de Brunehaut, 80200 Estrées Mons
- 4 Assemblée permanente des chambres d'agriculture (APCA), 9 avenue George V, 75008 Paris
- 5 Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA), 2 rue de Rome, BP30022 Schiltigheim, 67013 Strasbourg cedex
- 6 Arvalis-institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin, 75116 Paris
- 7 Chambre d'agriculture des Ardennes, 1 rue Jacquemart Templeux, CS 70733, 08013 Charleville-Mézières Cedex
- 8 Chambre d'agriculture de la Drôme, 95 avenue Georges Brassens, CS 30418, 26504 Bourg-Lès-Valence Cedex
- 9 Terres Inovia (ex-CETIOM), avenue Lucien Brétignières, Campus de Grignon, 78850 Thiverval-Grignon
- 10 Cirad de La Réunion, UR Recyclage et Risque, BP 20, 97408 St Denis Messagerie Cedex 9
- 11 Chambre régionale d'agriculture de Bretagne, Maison de l'agriculture, ZAC Atalante Champeaux, rond-point Maurice Le Lannou CS 74223, 35042 Rennes Cedex
- 12 Bergerie nationale, Parc du château, CS 40609, 78514 Rambouillet cedex
- 13 Frayssinet, Lamothe, 81240 Rouairoux
- 14 Institut français de la vigne et du vin (IFV), 210 boulevard Vermorel, BP 320, 69661 Villefranche-sur-Saône Cedex
- 15 INRA, Laboratoire d'analyses des sols (LAS), 273 rue de Cambrai, 62000 Arras
- 16 INRA, UMR SAS (Sol Agro et hydrosystèmes Spatialisation), 65 route de St Brieuc, CS 84215, 35042 Rennes Cedex
- 17 ITAB (Institut technique de l'agriculture biologique), 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12
- 18 ITB (Institut technique de la betterave), 45 rue de Naples, 75008 Paris
- 19 LDAR (Laboratoire départemental d'analyses et de recherche) de l'Aisne, Pôle du Griffon, 180 rue Pierre Gilles de Gennes, Barenton-Bugny, 02007 Laon Cedex
- 20 SAS Laboratoire, 270 avenue de la Pomme de Pin, 45160 Ardon
- 21 Syndicat mixte recyclage agricole du Haut-Rhin (SMRA68), 2 allée de Herrlisheim, 68000 Colmar
- 22 TRAME (Tête de réseaux pour l'appui méthodologique aux entreprises), 6 rue de la Rochefoucauld, 75009 Paris
- 23 Veolia Environnement Recherche & Innovation (VERI), chemin de la Digue, 78603 Maisons-Laffitte
- 24 VetAgro Sup, Campus agronomique de Clermont, 89 Avenue de l'Europe, BP 35, 63370 Lempdes

Correspondance : mathilde.heurtaux@acta.asso.fr ; amichaud@grignon.inra.fr

Résumé

Le projet « Réseau PRO » (2011-2014) a permis la constitution d'un réseau national d'essais étudiant les effets des épandages agricoles de produits résiduels organiques (PRO) dans des situations agro-pédo-climatiques très différentes et pour une grande diversité de PRO épandus. Ce réseau visait d'une part, à harmoniser les méthodes d'étude et de suivi des effets des PRO épandus au champ, et d'autre part à mutualiser les données acquises sur une grande diversité d'essais au champ. Ont ainsi été élaborés : un inventaire de 437 essais étudiant les PRO en France, un guide méthodologique opérationnel de conduite d'essai de plein champ sur les PRO, une méthode de référencement des PRO et une première ébauche de nomenclature, et un système d'information commun au Réseau PRO et au SOERE PRO. Par ailleurs, les données recueillies ont permis d'améliorer le paramétrage des outils développés au sein du RMT Fertilisation & Environnement (outils de diagnostic environnemental et de gestion de la fertilisation et du statut organique des sols). Enfin, l'analyse critique des jeux de données mutualisés a donné lieu à des recommandations pour les futurs essais.

Mots-clés : produits résiduels organiques, essai au champ, méthodologie d'essai au champ, protocole, système d'information, réseau d'essais, outil d'aide à la décision

Abstract: "PRO NETWORK" – Designing a field trial network and a database for assessing agronomic value and environmental and sanitary impacts of recycling organic residuals for agricultural use

The "PRO Network" project (2011-2014) has enabled the creation of a national network of trials investigating the effects of agricultural organic waste products (PRO) applications in very different agro-pedo-climatic situations and for a range of applied PRO. This network was firstly, to harmonize the methods of study and follow-up effects of PRO applied to the field, and secondly to pool data acquired on a wide range of field trials. Have thus been developed: an inventory of 437 tests of PRO in France, an operational methodological guide of field test on the PRO, a method of referencing of the PRO with a first draft of nomenclature, and an information system shared by PRO network and the PRO SOERE. Collected data led to improve the setting of the tools developed within the RMT fertilization & environment (Tools for environmental diagnosis and management of fertilization and the Organic Statute of the soil). Finally, the critical analysis of pooled data sets resulted in recommendations for future trials.

Keywords: organic residuals, field trial, field trial methodology, protocol, information system, network, decision-making tool

Introduction : contexte, objectifs et partenaires

Chaque année en France, près de 330 millions de tonnes de produits résiduels organiques (PRO) d'origines variées sont épandues sur les terres agricoles pour leur valeur fertilisante (amendement et/ou engrais). Dans un contexte agro-environnemental et réglementaire favorable à leur recyclage agricole, et au regard des enjeux environnementaux, économiques et énergétiques qui prévalent en France, cette pratique se présente comme la meilleure alternative à d'autres filières de traitement des PRO. Cependant, la grande diversité des PRO, des contextes d'apports (nature, volume et localisation des gisements de PRO, sol, cultures, climat) et des besoins agricoles (cultures concernées, types de sol) rendent nécessaire la connaissance plus précise des effets qui peuvent être attendus du retour au sol des PRO, dans chacune de ces situations variées. De plus, la nécessité d'assurer un recyclage optimal de la matière organique et des éléments fertilisants apportés au sol doit s'accompagner d'une maîtrise de leurs potentiels impacts environnementaux et sanitaires. L'optimisation de l'utilisation des PRO passe notamment par l'acquisition de données à court, moyen et long termes sur des essais de plein champ, conduits dans divers contextes agro-pédo-climatiques et pour une large gamme de PRO. En

outre, en vue de pouvoir comparer et exploiter conjointement les données acquises dans diverses situations, il convient d'harmoniser les méthodes employées sur les essais et en laboratoire.

Ainsi, le projet « Réseau PRO » visait à constituer un réseau d'essais au champ et d'acteurs de la filière des PRO, et élaborer une synthèse des essais de plein champ étudiant les effets du recyclage agricole des PRO, afin de connaître et prédire les effets des épandages de PRO dans une grande diversité de situations agro-pédo-climatiques et de PRO épandus. Les enjeux auxquels le projet s'est proposé d'apporter des réponses portent d'une part sur l'harmonisation, au sein d'un réseau national d'essais, des méthodes d'étude et de suivi des effets des PRO au champ, et d'autre part sur la mutualisation, dans une base de données, des données acquises sur une grande diversité d'essais au champ.

Le projet s'est appuyé sur l'expertise de partenaires de la recherche, du développement et de la formation, représentatifs des acteurs de la filière de gestion des PRO :

- six instituts techniques agricoles : ACTA, Arvalis-Institut du Végétal, Terres Inovia (ex-CETIOM), Institut français de la vigne et du vin (IFV), Institut technique de la betterave (ITB), Institut technique de l'agriculture biologique (ITAB)
- quatre instituts publics de recherche et d'enseignement supérieur : Institut national de la recherche agronomique (INRA Grignon, Arras, Rennes), AgroParisTech (UMR EcoSys), Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), VetAgro Sup
- l'Assemblée permanente des chambres d'agriculture (APCA) et trois chambres d'agriculture (Bretagne, Ardennes, Drôme)
- quatre organismes de développement et de transfert agricoles : Agro-Transfert Ressources & Territoires, TRAME (représentant l'« Association des agriculteurs méthaniseurs de France » et « Agriculteurs composteurs de France »), Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA), Syndicat mixte recyclage agricole du Haut-Rhin (SMRA68)
- deux laboratoires : Laboratoire départemental d'analyses et de recherche (LDAR) de l'Aisne, SAS Laboratoire
- deux entreprises : Frayssinet, VEOLIA Recherche & Innovation
- la Bergerie nationale de Rambouillet.

Le projet « Réseau PRO » était soutenu techniquement et scientifiquement par les RMT¹ « Fertilisation & Environnement » (RMT F&E) et « Quasaprove » et s'est déroulé de janvier 2011 à décembre 2014. Sa mise en œuvre a été permise grâce au soutien financier du MAAF² (via le CASDAR³) et de l'ADEME⁴.

1. Inventaire des essais étudiant les PRO en France

Une enquête a été menée en 2011 auprès des organismes menant des essais de plein champ pour étudier les effets du recyclage agricole de PRO, à l'aide d'un formulaire permettant de recenser les essais, leurs données et leurs méthodes. Les retours d'enquêtes ont ensuite été saisis dans des fichiers Excel. L'inventaire ainsi constitué se compose de 364 fiches décrivant les essais recensés, et d'une synthèse en étudiant la répartition par structure expérimentale, par thématique, par département ou région, par grand type de PRO, par durée, par culture, etc. (Figures 1 à 3).

Au cours de l'enquête, 437 essais ont été recensés, permettant de mettre en lumière le contexte expérimental français de l'évaluation des effets des PRO, de 1974 à 2012. Sur chacun des essais recensés, plusieurs PRO et/ou plusieurs thématiques peuvent avoir été étudiés simultanément. Le recensement montre que le nombre de dispositifs expérimentaux a augmenté de façon remarquable

¹ RMT : Réseau Mixte Technologique

² MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

³ CASDAR : Compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural »

⁴ ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

entre 1992 et 2000 (passant de 13 à 113 dispositifs par an) puis a diminué jusqu'en 2012 (Figure 1). Avant 1992, seuls des essais de longue durée (5 à plus de 10 ans d'expérimentation) ont été recensés. Ceci peut en partie être expliqué par le fait que l'historique et les résultats des essais de court et moyen termes (moins de 5 ans d'expérimentation) n'aient pas été archivés. Après 1992, la plupart des essais comptabilisés sont de courte durée (1 an), à moyenne durée (2 à 5 ans). Certains des essais de longue durée initiés dans les années 2000 (19 essais) sont encore en cours.

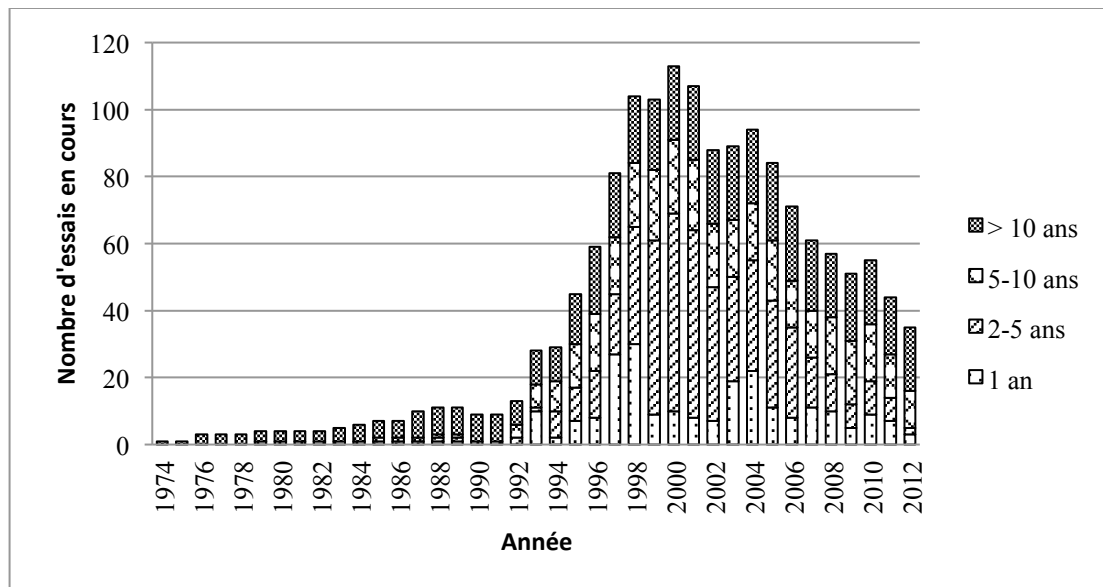


Figure 1 : Evolution du nombre d'essais en cours par an et répartition selon leur durée entre 1974 et 2012.

Plus de la moitié des essais inventoriés (253 dispositifs, soit 58 %) ont été conduits en grandes cultures, majoritairement en blé, maïs ou colza (Figure 2).

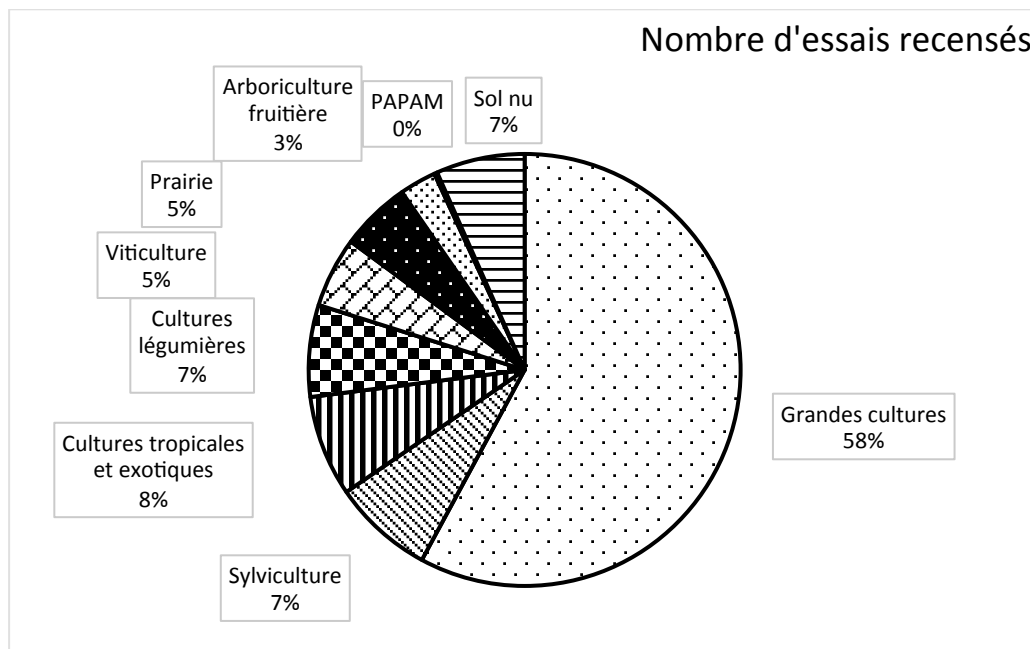


Figure 2 : Répartition des essais recensés par type de culture (PAPAM : plantes à parfum, aromatiques et médicinales – 1 seul dispositif).

Au moins deux PRO sont comparés sur les essais recensés, qu'ils soient de la même origine ou non. Près de 60 % des essais étudient des PRO urbains/industriels, 40 % des PRO issus d'élevage, 18 % des PRO d'origine végétale ou animale et 18 % des PRO mixtes. La majorité des PRO étudiés sont des

effluents d'élevage dits « non traités » (ni méthanisés, ni compostés) et des boues urbaines/industrielles : ces PRO sont étudiés respectivement sur 36 % et 28 % des essais recensés. Toutes origines confondues, les digestats de méthanisation sont étudiés dans moins de 2 % des cas.

Les essais sont relativement bien répartis sur tout le territoire, presque dans tous les départements (Figure 3), la composition des PRO étudiés variant logiquement selon leur origine géographique. En effet, les PRO épandus sur les dispositifs sont majoritairement (i) les effluents d'élevage, qui sont étudiés dans la majorité des régions enquêtées, surtout la Bretagne, la Réunion et le centre de la France, qui sont des régions présentant une forte représentation d'élevages, ainsi que (ii) les boues industrielles et urbaines, qui sont étudiées en plus grande proportion dans les régions du Nord-Est qui se trouvent être des régions fortement industrialisées par le passé.

L'étude a mis en évidence **onze thématiques d'étude des PRO**. Cinq thématiques portent sur les aspects agronomiques du recyclage des PRO en agriculture (effets azote, effets fertilisant P-K-Mg-S, effets amendants organiques, effets amendants pH et effets physiques), trois thématiques portent sur les impacts sanitaires et environnementaux (apports en éléments traces métalliques [ETM], en composés traces organiques [CTO] et en pathogènes). Les trois dernières thématiques abordées portent sur les aspects économiques et sociaux de l'apport de PRO (qualité des productions, services écosystémiques, impacts économiques). La principale thématique étudiée est l'étude des **effets fertilisants azotés des PRO** (90 % des essais recensés), et en particulier les effets azote à court terme (54 % des essais). Viennent ensuite les effets fertilisants « P, K, Mg et S » et les effets d'apports de PRO sur la qualité des productions agricoles (respectivement étudiés sur 35 % et 27 % des essais). Les thématiques les moins étudiées concernent les aspects environnementaux et sanitaires (contaminants), ce qui peut s'expliquer par le coût et contraintes spécifiques liés aux analyses associées à ces thématiques.

Les terminologies employées pour nommer et décrire les PRO étudiés sur les essais sont très diverses d'un essai à l'autre et ce, même si les PRO étudiés sont similaires. Une méthode de classement et de description des PRO, réalisée dans le cadre du Réseau PRO (cf. section 3 infra), a donc été utilisée pour pouvoir exploiter les résultats du recensement. On a ainsi été amené à distinguer quatre classes d'origine des PRO : PRO urbains/industriels, PRO issus d'élevage, PRO d'origine végétale ou animale autre et PRO d'origine mixte. Ces quatre classes sont ensuite subdivisées en « grands types » de PRO définis en fonction du traitement appliqué ou non sur le PRO (Tableau 1).

Un document synthétisant l'inventaire des essais au champ étudiant les PRO a été élaboré. Celui-ci comprend les 364 fiches descriptives des dispositifs, une analyse descriptive des dispositifs inventoriés et une comparaison avec l'inventaire des essais qui avait été établi par l'ADEME en 2002 (ADEME 2002). Il est consultable et téléchargeable au format pdf sur le site du RMT Fertilisation & Environnement. Les fiches peuvent y être consultées *via* un index qui facilite leur recherche par grand type de PRO étudié, par nombre de répétitions des dispositifs, par département, thématique étudiée, type de culture étudiée et organisme ayant conduit le dispositif. Les fiches transcrivent toutes les informations utiles relatives aux essais : nom de l'essai, localisation, organismes impliqués, contacts, contexte pédologique, système de culture, PRO étudiés, dispositif mis en place, suivis analytiques par compartiment (Bell et Leclerc, 2015).

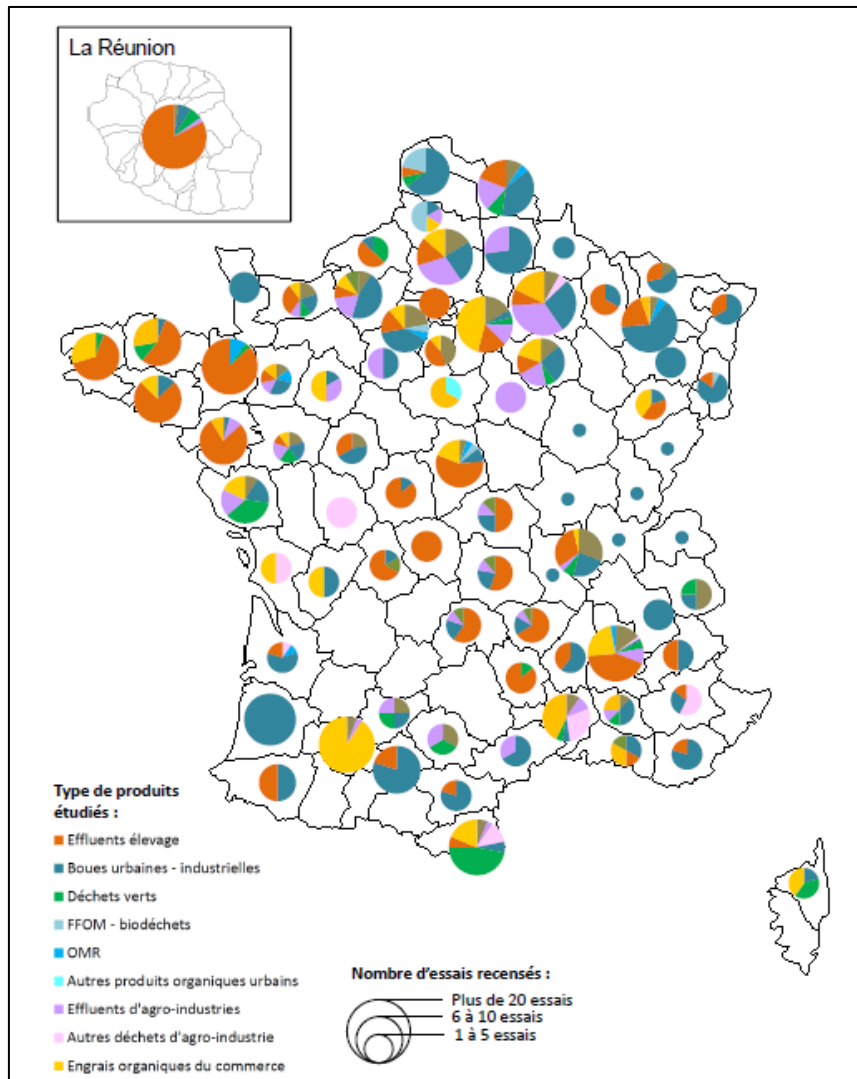


Figure 3 : Nombre d'essais recensés par département et par type de PRO étudié.

Origine des PRO testés	Grand type de PRO testés sur les essais	Pourcentage des essais recensés
Urbaine ou industrielle	Boue urbaine ou industrielle	28 %
	Sous-produit agro-industriel	19 %
	Compost urbain ou industriel	17 %
	Digestat urbain ou industriel	0,2 %
Elevage	Effluent d'élevage « non traité »	36 %
	Compost d'effluent d'élevage	14 %
	Digestat d'effluent d'élevage	0,2 %
Végétale ou animale autre	Matière organique animale	13 %
	Matière organique végétale	5 %
	Compost de matière organique végétale ou animale	2 %
Mixte	Matières organiques d'origine différente en mélange	11,9 %
	Compost de matières organiques mixtes	6 %
	Digestat de matières organiques mixtes	0,9 %

Tableau 1 : Pourcentage d'essais étudiant les différents grands types de PRO.

L'étude a montré un besoin de références sur les digestats de méthanisation toutes origines confondues : bien que la production de digestats ait augmenté ces dernières années du fait des avantages économiques que ce type de traitement représente, et plus récemment encore à la faveur du

plan EMAA⁵ du MAAF, les références sur les impacts de l'apport de digestats aux sols agricoles ne sont pas encore suffisantes. En 2015, plusieurs projets visant à acquérir des références sont en cours (projet ANR « DIVA : Caractérisation des Digestats et de leurs filières de valorisation agronomique » ; projet ADEME DOSTE « VADIM : Valorisation au champ de l'azote des digestats de méthanisation » ; projet régional des Pays de la Loire « VADIMETHAN : essais de Valorisation de digestats de méthanisation », projet ADEME DOSTE « PROLAB : Protocole de caractérisation des produits résiduaire organiques au laboratoire pour prédire leur comportement au champ »).

2. Rédaction d'un guide méthodologique opérationnel de conduite d'essai étudiant les PRO au champ

Les conclusions de l'inventaire des essais ont mis en exergue le manque d'harmonisation des protocoles et des modes opératoire mis en œuvre sur les essais, rendant difficile l'exploitation des résultats, en particulier des synthèses par grand type de PRO. L'importance des enjeux liés au recyclage agricole des PRO et le besoin de références rendent nécessaire la mise en place de démarches expérimentales coordonnées, s'appuyant sur des protocoles et des modes opératoire harmonisés. Pour ce faire, un guide méthodologique opérationnel a été élaboré dans le cadre du projet à l'intention des expérimentateurs (Damay et al., 2015). Celui-ci est par ailleurs issu d'une demande du groupe technique « RAPONA »⁶ du COMIFER d'actualiser sa brochure dite « Guide PONARA » (ACTA-COMIFER, 2010). Il vise à définir les méthodes de référence, au laboratoire et au champ (protocoles et modes opératoire), pour mettre en place des essais destinés à étudier les effets du recyclage agricole des PRO et à acquérir des références permettant de valider, dans différentes situations, des outils d'aide à la décision (ex. RegiFert™, AzoFert®, SIMEOS-AMG), des indicateurs de laboratoire (ex. P Olsen, incubations, ISMO) et d'apporter des outils d'évaluation fiables pour la normalisation et/ou l'homologation de produits (calcul de seuils, flux).

Un plan détaillé du guide a d'abord été établi et validé par l'ensemble des partenaires. Puis des groupes de travail thématiques ont été mis en place pour rédiger chaque partie du guide, s'appuyant sur les protocoles et modes opératoire existants, collectés notamment lors de l'inventaire des essais, et mobilisant des représentants des organismes partenaires du Réseau PRO en fonction des compétences spécifiques de chacun, ainsi que l'expertise d'experts externes au projet, spécialement sollicités.

Le guide présente tout d'abord le contexte réglementaire du recyclage agricole et les dispositions prises pour vérifier que ces produits (i) présentent un intérêt agronomique et (ii) sont inoffensifs pour l'homme, les animaux et l'environnement, avec trois fiches selon qu'il s'agit (i) de mise sur le marché, (ii) de plans d'épandage ou (iii) de dérogation. Il rassemble des protocoles d'essais au champ sur quatre grandes thématiques : azote, phosphore, effets à long terme sur la matière organique du sol, devenir des contaminants, ainsi que l'ensemble des modes opératoire d'échantillonnages, mesures et observations sur les sols, les plantes et les PRO nécessaires à la mise en œuvre des protocoles. Le document présente également des méthodes de mise en place d'un essai au champ (choix de la parcelle, choix du dispositif expérimental) et des procédures portant sur la qualité agronomique et statistique des données acquises, ainsi que sur l'exploitation statistique de ces données (Figure 4).

Ce guide opérationnel et consensuel, qui compte plus de 250 pages, permettra de fournir les bases communes à la mise en place d'essais au champ pour l'acquisition de données fiables, homogènes et plus aisément comparables d'un contexte agro-pédo-climatique à l'autre. Il facilitera également la

⁵ EMAA : Plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote, lancé conjointement par le ministère du Développement durable et le ministère de l'Agriculture, le 29 mars 2013. Ce plan s'inscrit dans une démarche agronomique fondée sur le respect de l'équilibre de la fertilisation et la réduction globale du recours aux intrants. L'objectif est de développer en France, à l'horizon 2020, 1 000 méthaniseurs à la ferme, contre 90 à fin 2012.

⁶ Groupe « Recyclage en Agriculture des Produits d'Origine Non Agricole », devenu par la suite le Groupe « PRO », pour « Produits Résiduaire Organiques »

mutualisation des connaissances acquises grâce à ces expérimentations dans des bases de données. Il est destiné à être diffusé le plus largement possible auprès des expérimentateurs. Il est notamment disponible et téléchargeable librement sur le site du RMT Fertilisation & Environnement (<http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org>). Le guide a déjà été utilisé pour produire des protocoles sur la thématique azote dans divers projets (PROLAB, VADIMETHAN...). Des actualisations (ajouts de protocoles...) pourront être effectuées pour adapter le guide à l'évolution des problématiques et des questions posées.

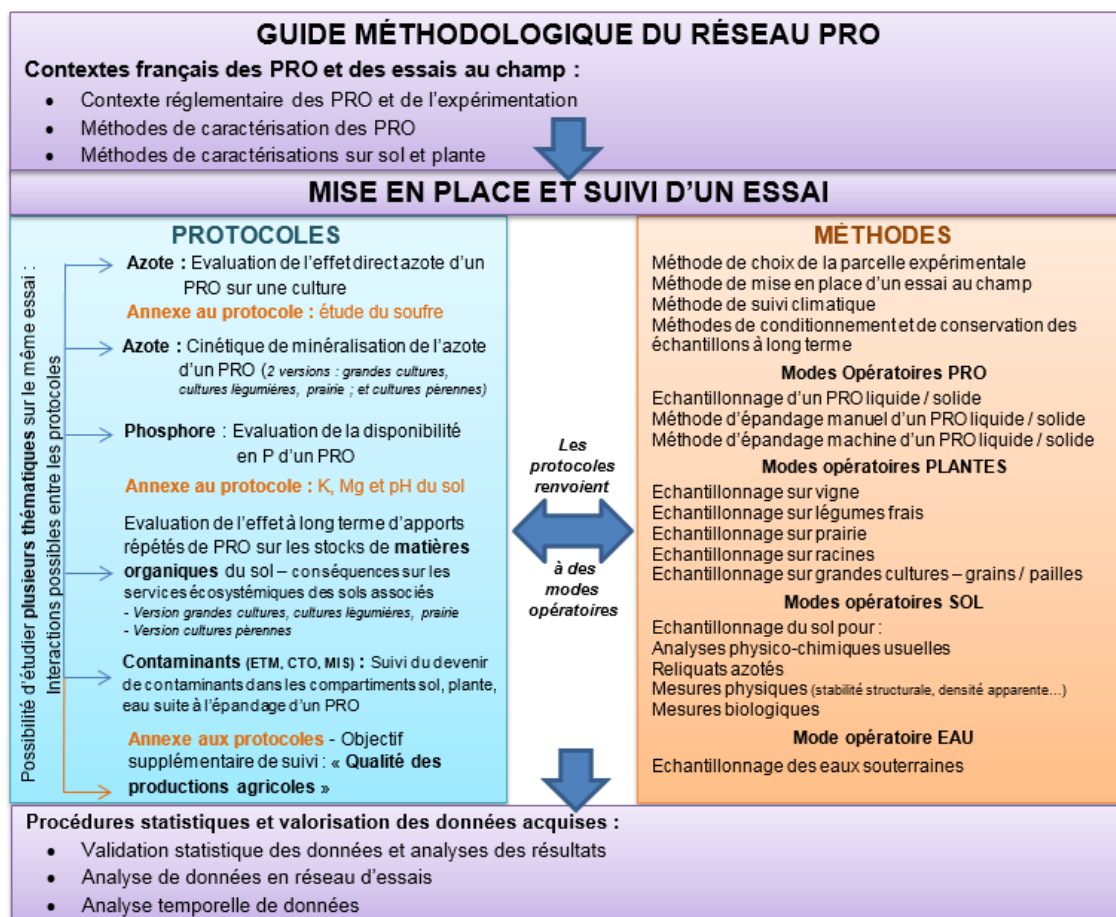


Figure 4 : Structure et contenu du guide méthodologique de conduite d'essai au champ sur les PRO.

3. Mutualisation des données : développement d'un Système d'Information national commun aux partenaires du Réseau PRO et du SOERE PRO

3.1 Développement du système d'information

Un des objectifs du Réseau PRO était de mettre en commun les données acquises sur les dispositifs expérimentaux recensés et les caractérisations des PRO épandus (ex. mode de production, traitement, stockage et analyses en laboratoire), en vue d'exploiter conjointement certains jeux de données. Ainsi, un système d'information⁷ (SI) national est développé pour archiver (i) les données expérimentales des dispositifs au champ du SOERE PRO⁸/Réseau PRO et (ii) les informations de production et les caractérisations analytiques des PRO épandus en France. Les travaux sont également mutualisés pour

⁷ **Système d'information (SI)** : ensemble organisé de ressources (matériels, logiciels, personnel, données et procédures) qui permet de gérer l'information (acquérir, traiter, stocker, communiquer) (Bensch 2001)

⁸ **SOERE PRO** : Système d'observatoires, d'expérimentations et de recherche en environnement étudiant l'impact du recyclage de PRO sur les différents compartiments d'un système de grandes cultures, piloté par l'INRA, UMR EcoSys.

certaines données (ex. sol, eau) avec les SOERE ACBB et F-ORE-T dans le cadre de l'appartenance de sites du SOERE PRO à ANAEE-France.

Plus précisément, le SI PRO a pour but d'archiver à terme :

- dans la composante « Dispositifs » : les informations de conduite des dispositifs SOERE PRO et Réseau PRO, leurs itinéraires techniques ; les données acquises sur les dispositifs SOERE PRO et Réseau PRO (variables suivies sur les compartiments PRO, sol, plante, eau, air ; variables suivies avec les équipements de type chambres de mesures de gaz et de climat du sol) ;
- dans la composante « PRO » ou BaseTYPO : les informations de production des PRO épandus en agriculture ; les données de caractérisations analytiques des PRO. Ces informations sont stockées dans une base spécifique « BaseTYPO » pouvant recevoir les informations et données des PRO utilisés sur les dispositifs et des PRO ne faisant pas l'objet d'étude au champ (e.g. données qui seront issues du projet PROtypo).

Le SI PRO est développé depuis fin 2013 par les informaticiens INRA et l'UMR EGC/EcoSys en collaboration avec les partenaires du SOERE/Réseau PRO (Arvalis, LDAR, ARAA, INRA, IFV, ITAB, CIRAD) (Michaud et al., 2014b). Celui-ci sera livré aux utilisateurs au fur et à mesure des développements.

En 2014, les parties du SI dédiées à la création et au référencement des dispositifs et des PRO ont été développées en intégrant du mieux possible les besoins des différents partenaires et acteurs du Réseau PRO et du SOERE PRO, et la diversité des situations pouvant être rencontrées dans les essais inventoriés dans le Réseau PRO et les PRO pouvant être épandus en France :

- (i) **Création et référencement des dispositifs** : fichiers d'insertion, tables et interface de saisie pour référencer les dispositifs (contexte, protocole, plan d'expérimentation).
- (ii) **Création et référencement des PRO étudiés** : fichiers d'insertion, tables et interface de saisie des informations de production des PRO épandus sur les dispositifs et en agriculture (*i.e.* origine, statut, période/lieu production, composition, procédé(s) de traitement, caractéristiques des matières premières, etc.) (cf. infra section 4).

3.2 Création d'une banque de données

En premier lieu, un **fichier de saisie unique par dispositif** a été développé sous Excel (Tableau 2), permettant d'intégrer la diversité des situations rencontrées dans le Réseau PRO (PRO, cultures, sols, climats, etc.), et de saisir le descriptif des dispositifs expérimentaux et des PRO étudiés, les itinéraires techniques et les différents jeux de données pouvant être acquis sur les dispositifs et les PRO (propriétés physico-chimiques des sols/PRO/eaux, composition des plantes, contaminants, reliquats azotés, incubations Carbone Azote, etc.).

En second lieu, les informations de description de **55 dispositifs expérimentaux** au champ et les jeux de données acquis sur ceux-ci ont été saisis dans le fichier de saisie ainsi développé (Tableau 3). Outre ces 55 dispositifs dont les données et informations ont été saisies, sont également considérés cinq dispositifs supplémentaires pour l'analyse et l'exploitation ultérieure des jeux de données considérés dans la banque de données. Les essais intégrés à la banque de données ont été définis en fonction (i) de la qualité de conduite et de suivis des dispositifs, (ii) de la disponibilité des partenaires pour renseigner les fichiers de saisie des données, et (iii) du temps disponible dans le projet pour saisir les jeux de données. Néanmoins, on note que les essais saisis dans la banque de données présentent une bonne représentativité au regard des dispositifs inventoriés, tant pour les types de cultures que pour les PRO et les thématiques étudiées. On observe en revanche une légère surreprésentation des dispositifs de longue durée et conduits en viticulture.

	Onglets	Contenu et objectif des onglets
Informations dispositif	Infos essai	Informations générales sur le dispositif, les objectifs, etc.
	Contexte	Historique et contexte pédoclimatique du dispositif
	Météo	Données météorologiques acquises pendant la durée de conduite de l'essai
	PRO étudiés	Description des PRO étudiés sur le dispositif (matières premières, traitement, stockage...)
	Dispositif	Description des traitements et des parcelles du dispositif (taille, répétitions)
	Itinéraire technique	Description de l'itinéraire technique complet l'année n-1 de mise en place du dispositif et pendant toute la conduite du dispositif
Données	PRO	Données PRO
	Sol	Données sol
	Reliquats	Données reliquats
	Plantes	Données plantes
	Intrant	Données intrants
	PRO et sol incubés	Informations sur les PRO et le sol incubé avec les propriétés et la préparation
	Incub sol + PRO C	Résultats d'incubation du sol seul, sol + PRO, PRO seul pour les minéralisations C
	Incub sol + PRO N	Résultats d'incubation du sol seul, sol + PRO, PRO seul pour les minéralisations N
	Incub sol	Résultats d'incubation du sol seul pour les minéralisations C et N, onglet spécifique aux cinétiques de sol
	Observations	Observations réalisées sur le dispositif
Evènements culturaux	Evènements intervenus pendant la conduite du dispositif	

Tableau 2 : Contenu du fichier d'insertion des données de référence et des données de chaque dispositif.

Partenaires	Nombre de dispositifs recensés	Nombre de fichiers de saisie complets renseignés	Thématiques étudiées sur les dispositifs
ARVALIS	5	1 + 3 considérés	Azote, effets amendant organique / P-K-Mg-S / physiques
CA 08	5	5	Azote, ETM
CA 26	4	3	Azote, P-K-Mg-S, ETM, pathogènes
CETIOM	6	6	Azote
CIRAD	3	3	Azote, ETM
CRAB	25	11	Azote, effets amendant organique / physiques
IFV	11	11	Azote, effets amendant organique / fertilisant P-K-Mg-S
INRA (SOERE PRO)	10	4 + 2 considérés	Effets agronomiques et environnementaux
ITAB	114	9	Azote (majoritairement)
SMRA 68 /ARAA	2	2	Azote, P-K-Mg, ETM, CTO

Tableau 3 : Banque de données constituée au cours du projet Réseau PRO, conduit conjointement avec le SOERE PRO, le fichier de saisie ayant été renseigné pour 55 dispositifs.

Les informations de conduite des 60 dispositifs considérés dans la banque de données et les fichiers Excel de saisie des données seront insérés dans le SI. A l'avenir, les données des dispositifs SOERE PRO devront être saisies, ainsi que celles des dispositifs considérés comme pertinents par les partenaires du Réseau (*i.e.* dispositifs considérés dans la banque de données et/ou inventoriés).

4. Élaboration d'une méthode de référencement des PRO en base de données

Comme l'inventaire des essais l'a mis en évidence, les terminologies employées pour désigner les PRO étudiés et le niveau d'informations disponibles permettant de décrire ces PRO (composition, traitements, etc.) sont très hétérogènes entre les essais. Un travail d'homogénéisation des terminologies relatives aux PRO et du niveau de précision de leur description s'est donc avéré nécessaire, en vue de (i) pouvoir mutualiser les données relatives aux PRO et les informations sur leur origine, (ii) se doter d'une nomenclature nationale consensuelle des PRO (PRO regroupés par terminologie permettant de les désigner et les ordonner) et (iii) acquérir des informations et données fiables sur l'historique d'obtention du PRO et sa composition afin de pouvoir identifier *in fine* les variables descriptives des PRO influençant leurs caractéristiques analytiques voire leurs effets au champ.

Dans le cadre de l'élaboration du SI PRO, une méthodologie de référencement des PRO a donc été proposée pour décrire les PRO (épandus ou non en agriculture), en termes d'origine, de composition et de traitement. Parallèlement, une nomenclature nationale des PRO a été élaborée sur la base de plusieurs critères permettant de classer les PRO par type, en fonction de leur composition/nature. Ces différents critères ont été intégrés dans une méthode de description développée sur Excel, s'appuyant sur des listes de choix de réponses pour chaque information demandée afin d'homogénéiser les terminologies. L'ensemble de ces informations sont ensuite reliées en base de données aux données analytiques acquises sur le PRO et éventuellement à celles acquises sur un essai au champ sur lequel le PRO a été étudié. Une interface de saisie en ligne dédiée au référencement des PRO a été développée.

La méthode s'appuie sur trois niveaux de renseignement, interdépendants dans le SI :

- **Description générale du PRO** : nom que l'utilisateur souhaite donner au produit, origine des matières organiques entrantes, grand type de PRO (compost, digestat, matière organique non traitée, etc.) et type de PRO (intitulé de la nomenclature) ; personne référente ; statut (déchet, homologation, norme associée...) ; forme physique (pulvérulent, liquide, solide...) ; épandu ou non sur un dispositif expérimental.
- **Composition du PRO** : nom, proportion et caractéristiques techniques (type d'élevage, type de station d'épuration...) de chaque matière première.
- **Procédés de traitement permettant d'obtenir le PRO** : nature, dates et ordre chronologique des procédés appliqués au mélange de matières premières du PRO. A chacun des procédés peuvent être associées des méthodes (ex. : méthanisation en voie humide puis compostage en andain avec retournement), des caractéristiques générales (température maximale atteinte lors du procédé, nombre de retournements, etc.) ainsi que des caractéristiques d'étapes (ex. : durée, méthode, température des étapes de maturation et de fermentation du compostage).

La méthode proposée (Bell et al., 2013c ; Bell et al., 2014b) permet ainsi une traçabilité de l'historique de production d'un PRO, allant jusqu'à l'historique des matières premières le composant (caractéristiques de production, procédés appliqués en amont sur la matière première, etc.). Ce niveau de détail permettra à terme, en lien avec les données acquises au laboratoire ou au champ, d'avoir une meilleure connaissance des PRO, d'évaluer l'impact de l'origine des matières premières et des méthodes de production sur la qualité d'un produit et ses effets au champ.

Enfin, cette méthode se veut évolutive. Le système d'information a été conçu de façon à être souple et permettre d'intégrer facilement les éventuels nouveaux procédés, matières premières, etc. Elle a été testée pour certains PRO évalués dans les essais du Réseau PRO. Elle s'adapte aisément à la classification et la description d'une grande diversité des PRO recyclés en France d'origine urbaine, industrielle et agricole. Tout expérimentateur souhaitant stocker de façon durable et fiable les données et informations acquises sur des PRO pourra le faire *via* l'interface développée par la cellule EcoInfo (INRA Orléans).

5. Exploitation des données

Les données collectées dans le Réseau PRO et constituant la banque de données ont fait l'objet d'un début d'analyse critique et d'exploitation. Ainsi, un bilan des informations disponibles et manquantes a été effectué, les données disponibles ont fait l'objet de traitements statistiques, et certaines données disponibles ont été utilisées pour tester voire améliorer des modèles (devenir des éléments traces métalliques, calcul de bilan humique à long terme) et outils (diagnostic des pertes d'azote).

5.1 Bilan des données disponibles et des informations manquantes

Un bilan des données disponibles et des informations manquantes a été établi au vu de l'analyse des essais inventoriés et des essais considérés dans la banque de données pour identifier le potentiel d'exploitation des jeux de données mutualisés (*i.e.* la banque de données) et potentiellement disponibles (*i.e.* essais inventoriés), et permettre d'orienter de futurs programmes expérimentaux à mettre en place (ex. pour acquérir de nouvelles références, couvrir les thématiques liées au recyclage agricole des PRO et finaliser la validation des outils).

La comparaison entre les dispositifs inventoriés et ceux considérés dans la banque de données montre que les dispositifs de la banque de données reflètent globalement correctement l'inventaire des expérimentations au champ pour : (i) les régions dans lesquelles des dispositifs ont été conduits au niveau national, excepté le Nord, la Normandie et les quelques dispositifs conduits dans les régions peu étudiées (Auvergne, Bourgogne, Franche-Comté, Poitou-Charentes et Limousin), (ii) les PRO inventoriés, (iii) les thématiques étudiées (tableau 4), avec une surreprésentation des dispositifs de longue durée et des thématiques associées dans la banque de données par rapport à l'inventaire et (iv) les types de culture.

Thématique d'étude	% dispositifs inventoriés	% dispositifs de la banque de données	Importance pour les agriculteurs ⁹
Effets azote	85 %	90 %	
<i>dont effets – durée inférieure à 3 ans</i>	68 %	40 %	***
<i>dont effets – durée supérieure à 3 ans</i>	17 %	50 %	
Effets fertilisants P, K, Mg, S	35 %	43 %	***
Effets amendant MO	19 %	42 %	**
Effets physiques sur le sol	10 %	15 %	*
Effets amendant pH	13 %		*
Devenir des Eléments Traces Métalliques	21 %	27 %	*
Devenir des Composés Traces Organiques	6 %	7 %	*
Pathogènes	2 %	12 %	
Qualité des productions	27 %	5 %	
Services écosystémiques	5 %	7 %	*
Impacts économiques	9 %	0 %	*

Tableau 4 : Comparaison des thématiques étudiées dans les dispositifs inventoriés et ceux de la banque de données.

Les PRO majoritairement étudiés dans les dispositifs inventoriés et dans la banque de données sont : les effluents d'élevage non traités (fumier, lisier) et compostés, les boues et les composts principalement urbains, les produits d'origine agroindustrielle/industrielle et les engrais organiques ou les matières animales. En revanche, on note que les digestats de méthanisation d'origine agricole, mixte, urbaine ou agroindustrielle/industrielle sont très peu étudiés dans les dispositifs recensés et intégrés à la banque de données, tout comme les digestats compostés, ainsi que d'autres grands types

⁹ L'estimation du degré d'importance des thématiques pour les agriculteurs est issue de l'enquête effectuée en Alsace par C. Bodet (2014).

de PRO tels que les fientes de volailles, les coproduits du traitement des lisiers, les sous-produits et les effluents agroindustriels/industriels bruts ou compostés.

Les **données** les plus fréquemment acquises **sur les PRO** sont la teneur en matière sèche, la teneur en N total, P_2O_5 , K_2O , CaO, MgO, C organique et un indicateur de stabilité de la matière organique (ISB ou ISMO¹⁰). Toutefois, les méthodes d'acquisition ne sont pas renseignées pour toutes ces variables, notamment pour les éléments majeurs (P_2O_5 , K_2O , CaO, MgO). Les ETM majoritairement suivis dans les PRO épandus sont le cuivre (Cu) et le zinc (Zn), puis le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le plomb (Pb). Pour les ETM, les méthodes sont renseignées sur environ la moitié des 15 dispositifs sur lesquels ils ont été étudiés.

Les variables majoritairement analysées sur des **échantillons de sol** provenant des dispositifs d'une durée supérieure ou égale à deux ans sont : la teneur en carbone organique, le pH, la capacité d'échange cationique, la teneur en P_2O_5 et en azote total, et un peu moins fréquemment, les teneurs en K_2O , MgO et CaO, la granulométrie et la densité apparente. Les teneurs en Na_2O , $CaCO_3$, cations échangeables et la biomasse microbienne sont moins souvent étudiées. Les méthodes sont renseignées pour la majorité des dispositifs pour le pH et la CEC, elles sont moins renseignées pour la teneur en N total, C organique et P_2O_5 , voire peu renseignées pour les autres variables. Les ETM majoritairement étudiés sont Cu, Zn, Ni, puis Cd, Cr et Pb, et Hg.

Enfin, des données ont été acquises sur les **échantillons de plante** prélevés sur les dispositifs conduits sur une durée d'un an pour les propriétés agronomiques et les éléments en traces métalliques, avec : le rendement estimé à différents taux d'humidité en fonction des dispositifs (9 %, 15 %), à différentes températures de séchage des organes récoltés (105 °C, 80 °C), le rendement et le poids estimés en sec ou en frais sans précision de l'humidité ou de la température de séchage, la matière sèche, le nombre d'épis et de pieds, le poids des épis, des tiges et de 1000 grains. Sont également mentionnées les teneurs en huile (pour le colza), azote, protéines et, plus rarement, en ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn). Les rendements et le poids sont globalement estimés sur les dispositifs d'une durée d'un an. Toutefois, les différentes estimations (température, expression des résultats, parties analysées) sont peu homogènes. La teneur en azote est la variable majoritairement suivie sur les dispositifs annuels considérés, devant le poids de 1000 grains.

Les jeux de données acquis sur les cultures provenant des dispositifs d'une durée supérieure ou égale à 2 ans, quant à eux, n'ont pas pu être analysés faute de temps et d'homogénéité entre les dispositifs. Ainsi, la diversité des espèces, des parties récoltées et analysées (ex. bois, fruits, limbe, pétiole, grains, tiges...) et des stades de développement considérés rend compliquée la synthèse des jeux de données. En outre, les variables analysées ont différé entre les dispositifs et parfois sur un même dispositif au cours du temps, créant ainsi des « vides » dans les séries mesurées par dispositif et des hétérogénéités entre les dispositifs.

L'analyse des dispositifs inventoriés a permis de mettre en évidence les **thématiques peu étudiées**, pour lesquelles des informations seraient à compléter :

- les risques associés à la fertilisation azotée (lessivage d'azote et émissions de gaz à effet de serre),
- la fertilisation phosphatée pour différents contextes (estimation de la [bio]disponibilité du phosphore, gestion des risques de sur-fertilisation et des cas de déficiences, entretien de la fertilité P),
- la fertilisation en soufre,
- le statut en matières organiques (entretien du stock et potentiel de stockage), les effets physiques liés (stabilité de la structure, risques de compaction du sol),
- les effets globaux d'apports de PRO sur les propriétés physico-chimiques des sols (ex. pH, MO, densité apparente, stabilité structurale, teneurs/biodisponibilité en éléments majeurs et oligo-éléments), pour une diversité de contextes (PRO, sol, climat),

¹⁰ ISB : Indice de stabilité biochimique, ISMO : indice de stabilité de la matière organique.

- les effets globaux d'apports de PRO sur les propriétés biologiques des sols pour une diversité de contextes (PRO, sol, climat),
- l'apport éventuel, par les PRO, d'ETM considérés comme oligo-éléments et/ou toxiques (dont ETM hors réglementation), leur biodisponibilité, leur devenir après apport et les risques d'accumulation à long terme, compte tenu des propriétés initiales des sols et de l'évolution des propriétés physico-chimiques avec l'apport de PRO,
- l'apport et le devenir de contaminants traces organiques (CTO), en particulier les résidus médicamenteux et hormonaux, leur biodisponibilité pour les organismes telluriques,
- l'apport et le devenir de pathogènes humains, de souches résistantes à des antibiotiques,
- la dynamique des communautés biologiques telluriques, en lien avec les cycles C-N-P et la dynamique des contaminants,
- les effets sur la présence éventuelle de mycotoxines dans les produits récoltés,
- les effets d'apports de PRO sur la résistance des cultures aux maladies,
- une approche intégrée des impacts positifs et négatifs des apports de PRO, par analyse du cycle de vie (ACV) ou évaluation multicritère de la durabilité.

En outre, au vu de l'analyse des grands types de PRO étudiés sur les dispositifs inventoriés et considérés dans la banque de données, il serait pertinent d'acquérir des références sur la valeur agronomique et les éventuels risques associés au recyclage des **grands types de PRO** suivants :

- fientes de volailles brutes ou traitées,
- coproduits du traitement du lisier et autres produits issus des nouvelles installations d'élevage (ex. boues provenant de la séparation des fèces et de l'urine),
- digestats de méthanisation toutes origines (agricole, urbaine, agroindustrielle/industrielle et mixte), en considérant l'évolution du mélange de matières premières dans l'année et entre sites de production, et en distinguant les digestats bruts des digestats issus de séparation de phase,
- digestats compostés,
- sous-produits et effluents agroindustriels non traités (si recyclés),
- sous-produits végétaux d'origine agricole (ex. bois raméal fragmenté).

Par ailleurs, peu de dispositifs ont été recensés en culture légumière (7 % des dispositifs), sylviculture (7 % des dispositifs), en arboriculture fruitière (3 % des dispositifs) et en prairies permanentes ou temporaires (5 % des dispositifs) (Figure 2).

5.2 Analyse des données de la banque de données et traitements statistiques

La grande majorité des dispositifs de la banque de données ont été conduits en grandes cultures (65 %), généralement avec du blé tendre et du maïs, et majoritairement pour évaluer les effets de fertilisation azotée à court terme. Viennent ensuite les dispositifs conduits en viticulture. Un grand nombre de dispositifs de longue durée (supérieure ou égale à 10 ans) ont été intégrés à la banque de données, avec 15 dispositifs étudiant majoritairement l'azote, la matière organique et les effets P-K-Ca-Mg. Une grande diversité de types de PRO a été recensée (*i.e.* plus d'une centaine de terminologies différentes recensées), compliquant potentiellement l'agrégation des données entre elles.

Les objectifs des dispositifs sont variés à l'intérieur de la banque de données, du fait de la différence d'enjeux locaux et des partenaires ayant motivé la mise en place des dispositifs. Ceci induit de fortes différences en termes de conduite des sites et des suivis effectués sur ces dispositifs. En outre, la nature des variables étudiées et leurs méthodes d'acquisition, ainsi que le nombre de points de mesure, c'est-à-dire la fréquence à laquelle une variable est mesurée sur un dispositif, le nombre de répétitions et la durée d'acquisition des variables diffèrent entre les dispositifs.

Au regard de cette grande hétérogénéité de conduite des dispositifs, des jeux de données acquis entre les dispositifs et des terminologies employées pour les PRO, il a été impossible d'appliquer des tests

statistiques d'analyses en réseau d'essai pour les jeux de données sol/plante ou d'agrèger l'ensemble des jeux de données PRO.

Le constat de la grande diversité de terminologies de types de PRO confirme le besoin de disposer d'une codification consensuelle entre partenaires et acteurs de la filière *via* l'élaboration d'une **nomenclature**, qui permettra notamment d'améliorer et homogénéiser les intitulés de types de PRO de la banque de données et *in fine* les traitements étudiés sur les dispositifs.

Au vu de ce constat, des choix faits et du temps restant disponible en fin de projet pour exploiter statistiquement les jeux de données, il a été possible d'analyser les jeux de données agronomiques des PRO et du sol de six dispositifs de longue durée dont les méthodes d'analyse en laboratoire étaient similaires et comparables, en vue de (i) caractériser les types de PRO épandus sur les dispositifs en termes de teneurs en éléments majeurs, et (ii) analyser les effets d'apports répétés de PRO sur l'évolution des paramètres agronomiques du sol, en fonction du temps, des caractéristiques analytiques des PRO apportés et du contexte dans lequel les PRO sont épandus.

L'analyse statistique des jeux de données concernant la caractérisation de ces types de PRO épandus sur ces essais a montré que :

- la boue de station d'épuration est la plus concentrée en phosphore total et azote total,
- le fumier de bovins et son compost sont les plus concentrés en carbone organique, en potassium et magnésium total,
- le compost de biodéchets et d'ordures ménagères sont les plus concentrés en calcium total,
- une discrimination des PRO est visible en fonction de leur teneur en matière sèche, c'est-à-dire de leur structure plus ou moins solide,
- le lisier de porc est le type de PRO le plus variable en teneurs en éléments majeurs,
- chaque PRO et son compost ont des caractéristiques similaires.

Par ailleurs, l'apport répété de PRO a globalement eu des effets similaires sur l'évolution des paramètres agronomiques du sol comparativement au témoin sans apport organique pour la teneur en phosphore, potassium, magnésium, azote total et carbone organique, un même type de PRO amenant à une évolution similaire de ces paramètres sur chaque essai.

En considérant les mêmes types de PRO épandus sur les différents dispositifs, les résultats suivants ont pu être observés :

- la boue et le compost de boue en mélange avec des déchets verts augmentent significativement les teneurs en **phosphore** dans le sol et de façon plus importante que les autres PRO pour cinq des six dispositifs considérés. Ceci peut être lié à la plus forte teneur en P de ces PRO;
- le fumier de bovin et son compost augmentent significativement les teneurs en **potassium** et en **magnésium** dans le sol, et de façon plus importante que les autres PRO respectivement pour trois et cinq dispositifs sur les cinq dispositifs dont les données étaient disponibles pour ces paramètres. Ceci peut être lié à la plus forte teneur en potassium des fumiers de bovins comparativement aux autres types de PRO, le lien est moins net concernant le magnésium;
- le compost de boue en mélange avec des déchets verts augmente significativement les teneurs en carbone organique et en azote total, et de façon plus importante que les autres PRO pour trois des quatre dispositifs dont les données étaient disponibles pour ces paramètres. Ceci serait à mettre en lien avec sa composition plus importante en lignine et donc à la stabilité de sa matière organique.

Cette analyse pourrait utilement être améliorée (i) en prenant en compte les données biochimiques des PRO (composition en matières premières, indice de stabilité de la matière organique), (ii) en découpant les grandes classes de PRO définies en classes plus fines (par exemple prenant en compte le temps de stockage, le procédé de traitement, et/ou le type d'alimentation pour les effluents d'élevage), (iii) en intégrant aussi les données de dispositifs pour lesquels il n'a pas été possible d'exploiter les données

pour cause de non disponibilité et/ou (iv) les dispositifs dont les données restent à saisir. De plus, il serait intéressant de compléter les résultats techniques par une étude économique dans différentes situations.

Ce travail d'analyse a également permis de proposer des pistes d'amélioration pour pouvoir analyser dans l'avenir, en toute rigueur, chaque dispositif et pour pouvoir agréger les données de façon légitime.

5.3 Devenir et phytodisponibilité des éléments traces métalliques (ETM)

Les recherches menées ces dernières décennies sur la dynamique des ETM dans les sols recevant des apports répétés de PRO ont permis la mise en place de réglementations qui limitent à court terme (< 5 ans) l'accumulation dans les sols et le transfert des ETM vers les organismes vivants (biodisponibilité) dans la très large majorité des contextes agronomiques français. Sur le moyen (5-10 ans) et le long terme (> 10 ans), les évidences expérimentales de terrain sont plus rares mais suggèrent une accumulation progressive des ETM dans les sols, dont la biodisponibilité reste difficile à estimer.

Pour passer de ce constat qualitatif et *a posteriori* à une véritable évaluation quantitative et prospective du risque « ETM », **un outil de modélisation prédictive simple basé sur le bilan entrée/sortie des ETM à la parcelle a été développé et validé à l'aide de trois essais appartenant au Réseau PRO**, représentatifs de pratiques agricoles contrastées et ayant fait l'objet d'un suivi « ETM » conséquent. Le cuivre (Cu), le nickel (Ni) et le zinc (Zn) y ont plus particulièrement été suivis dans les PRO, les plantes, les produits phytosanitaires et le sol. L'accumulation de Cu, Ni et Zn dans le sol a été modélisée à l'aide d'un bilan de masse annualisé tenant compte des flux d'entrée des ETM par apport de PRO, d'engrais minéraux et dépôts atmosphériques et des flux de sorties des ETM par lixiviation et prélèvement par les parties récoltées des plantes cultivées.

Les trois éléments traces étudiés pour la validation du modèle d'accumulation dans les sols ont chacun présenté une dynamique distincte, et ce, de manière similaire pour les trois essais étudiés. Aucune accumulation de Ni n'a été observée, ce qui a été principalement attribué au faible apport de Ni par les PRO relativement au stock initialement et naturellement présent dans les sols. Une accumulation de Cu et de Zn a été observée lors de l'apport de PRO au sol, contrairement aux modalités de fertilisation minérale pour lesquelles aucune accumulation n'a été observée. Le modèle a correctement représenté les variations temporelles de concentrations totales en Ni et Zn dans le sol pour l'ensemble des modalités de fertilisation testées dans les trois essais. Le modèle a en revanche sous-estimé l'accumulation de Cu observée dans les sols recevant certains apports de PRO des essais sur cultures maraîchères et prairie. Cette sous-estimation a été attribuée à de possibles transferts de Cu dans le sol sous forme particulière (lessivage) qui restent difficiles à prendre en compte dans le modèle.

Un travail complémentaire visant à **évaluer au laboratoire la biodisponibilité des ETM** pour les plantes (phytodisponibilité) a été mené sur des échantillons de sol prélevés en 2013 sur un essai d'épandage de PRO (origines urbaine et d'élevage) réalisé pendant 16 ans sur une rotation blé-maïs en région parisienne. Ces échantillons de sol ont été mis en culture à l'aide du dispositif RHIZOtest permettant d'évaluer la phytodisponibilité d'une large gamme d'ETM en conditions contrôlées de laboratoire. Les mesures de phytodisponibilité des ETM à l'aide du RHIZOtest ont mis en évidence des différences significatives entre les différentes modalités de l'essai blé-maïs. L'apport de PRO au sol a par exemple généré une diminution de la phytodisponibilité de Ni et du cadmium notamment, et à l'inverse, une augmentation de la phytodisponibilité de l'arsenic.

Ces premiers travaux menés sur un ensemble d'essais de longue durée appartenant au Réseau PRO ont permis (i) de valider l'utilisation d'un modèle pour la prédiction de l'accumulation à long terme des éléments traces dans les sols agricoles et (ii) de développer un test biologique de laboratoire permettant d'évaluer la phytodisponibilité de ces éléments traces en contexte d'apports répétés de PRO (Bravin et al., 2014). Appliqué aux échantillons de sol d'essais du Réseau et du SOERE PRO, le

couplage de cette démarche de modélisation et de la réponse de tests biologiques de laboratoire tels que le RHIZOtest ouvre des perspectives pour le développement d'une méthodologie d'évaluation du risque « éléments traces » sur le long terme.

5.4 Alimentation d'outils de gestion de la fertilisation et du statut organique des sols

Les données du Réseau PRO ont été utilisées pour valider, voire contribuer à améliorer le paramétrage ou le domaine d'application d'outils de gestion du statut organique des sols à long terme (Simeos-AMG) et d'évaluation des risques environnementaux (Syst'N®) développés au sein du RMT F&E. D'autres outils, par exemple des outils de calcul de dose prévisionnelle d'azote comme AzoFert®, prennent en compte la valeur fertilisante des PRO, mais n'ont pas fait l'objet de travaux dans le cadre de ce projet.

Modèle AMG et son application à la vigne

En 2013, un travail de paramétrage du modèle AMG a été réalisé pour l'adapter à une utilisation en parcelles de vignes. Pour ce faire, l'ajustement du modèle dans sa version actuelle développée pour les grandes cultures a été testé à partir des données issues de l'essai de longue durée (1976 à 2004) situé à l'INRA de Chinon. Toutes les mesures nécessaires au fonctionnement du modèle n'ayant pas été réalisées au cours de l'expérimentation, certaines données ont dû être recherchées, soit à partir d'autres données expérimentales, soit à partir de la bibliographie. Une étude de sensibilité a également été menée sur le modèle AMG, de façon à mettre en évidence les facteurs les plus impactants sur les sorties du modèle, dans le cas de la vigne. Les gammes de variation des différents facteurs ont été définies à partir des résultats du réseau MO conduit par l'IFV.

Les résultats obtenus montrent que le modèle AMG, dans son formalisme actuel, est assez bien adapté à une utilisation sur des parcelles de vignes et qu'il estime correctement l'évolution des stocks de carbone lorsqu'il n'y pas d'apport de PRO. En revanche, la prise en compte des apports de C organique au sol par les PRO n'est pas satisfaisante pour le moment, en lien probable avec une connaissance incomplète du mode d'intégration du carbone du PRO dans le sol. Des améliorations du formalisme du modèle sur ce point sont donc à prévoir dans le cadre de travaux ultérieurs, en parcelles agricoles ou viticoles. L'analyse de sensibilité, quant à elle, met en évidence une influence prépondérante de la quantité de bois de taille, du taux d'argile et du taux de calcaire sur les sorties du modèle. L'effet des apports de carbone au sol par les feuilles des vignes est moindre mais ne devrait pas être négligé dans le calcul du bilan opéré par le modèle. Cependant, la biomasse des feuilles restant sur les parcelles à la récolte peut être très variable au sein même d'une parcelle et sa mesure systématique sur des parcelles de production reste difficile à envisager. Elle serait néanmoins à prévoir dans les protocoles de suivi des essais (Duparque et al., 2014).

Outil Syst'N®

Syst'N® est un outil destiné aux acteurs de l'agriculture pour leur permettre de réaliser le diagnostic des pertes d'azote des systèmes de cultures au sein de leur territoire. L'objectif premier du travail était d'évaluer la prise en compte des PRO par l'outil Syst'N, et éventuellement d'améliorer le paramétrage du formalisme de la minéralisation de certains de ces PRO. Le second objectif était de qualifier la précision du modèle, au regard des objectifs de l'outil Syst'N (usage par des conseillers pour comparer des systèmes de culture notamment).

Syst'N inclut un simulateur : c'est un modèle dynamique du cycle de l'azote qui simule les flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère et les pertes en azote des systèmes de culture. Des données expérimentales issues du Réseau PRO ont été utilisées pour réaliser l'évaluation de la prise en compte de ces PRO par le modèle inclus dans Syst'N. Les PRO retenus pour l'évaluation ont été le fumier de bovins et le lisier de porcs. Treize essais du Réseau PRO ont été sélectionnés initialement pour évaluer

l'outil. Pour évaluer l'erreur du modèle, des représentations graphiques et des indicateurs ont été utilisés.

Les évaluations avec les traitements témoin ont tout d'abord permis de déceler une erreur dans la modélisation de la minéralisation de la MO des sols, qui a pu être corrigée. Les résultats ont ensuite montré que la qualité des simulations des effets du fumier de bovins et du lisier de porcs présentait une grande variabilité d'un essai à l'autre et pour un même essai, d'une année à l'autre, et aucun biais systématique n'a pu être mis en évidence. En effet, les écarts simulés-observés semblent être en premier lieu dus à la modélisation de la minéralisation de la MO des sols et à l'absorption d'azote par les cultures. Ce travail n'a donc pas pu aboutir à une amélioration du paramétrage des PRO. Cependant, cette évaluation a permis de commencer à qualifier le modèle en termes de précision (écarts fréquents de l'ordre de 20 à 30 kg N/ha) et de donner des pistes en vue d'améliorer les performances du modèle (Parnaudeau et Cabanes, 2014).

Dans le futur, le travail d'évaluation, d'amélioration et de qualification de l'outil sera poursuivi. Pour cela, la base de données du Réseau PRO est un outil précieux puisque sont présentes la plupart des informations nécessaires à Syst'N. Cependant, un « contact » pour les différents essais semble indispensable, pour préciser certaines informations sur les essais, aider à comprendre les résultats d'essai, voire corriger quelques erreurs qui demeurent dans la base.

6. Transfert et valorisation des résultats du projet

Les documents et outils issus du projet, produits d'un travail collaboratif consensuel entre acteurs de la filière des PRO, ont vocation à être mis à la disposition de l'enseignement agricole, des expérimentateurs et autres acteurs de la recherche-développement, des législateurs et des agriculteurs, pour être exploités, voire également enrichis et actualisés. Diverses actions ont été menées dans cet objectif.

6.1 Diffusion des documents de référence

L'inventaire des essais et le guide méthodologique sont téléchargeables librement sur le site Internet du RMT Fertilisation & Environnement. Le site du COMIFER et la future plate-forme collaborative sur les matières organiques serviront en outre de relais pour la diffusion de ces documents. Le public cible est essentiellement constitué des conseillers et techniciens agricoles souhaitant mettre en place des essais au champs, des personnels des lycées agricoles et des étudiants, des chambres d'agriculture, des instituts techniques et de recherche désireux de connaître le contexte expérimental au champ français sur le recyclage agricole des PRO et/ou mettre en place un dispositif au champ.

La prise en main du guide méthodologique a été testée *via* l'utilisation de certains protocoles pour la mise en place de nouveaux dispositifs expérimentaux en Loire Atlantique et à La Réunion. Les rédacteurs référents de chaque partie, dont le nom et les coordonnées sont mentionnés dans les documents, se tiennent à la disposition des utilisateurs et des lecteurs pour répondre à leurs éventuels interrogations et besoins de compléments d'information.

6.2 Valorisation pédagogique du projet

Les résultats du projet ont fait l'objet d'une valorisation pédagogique à trois niveaux :

- treize stagiaires et une apprentie ont été encadrés au cours du projet par les partenaires du projet,
- une formation intitulée « Construire une séquence pédagogique consacrée aux conduites d'essais au champ – Application à l'utilisation des produits résiduels organiques (PRO) » a été montée et dispensée à des enseignants de lycées agricoles en agronomie et mathématique (Michaud et Bell 2014),

- une formation sur l'analyse de réseau temporel intitulée « Analyse de réseaux d'essais et de données répétées avec R » a été montée et dispensée par ARVALIS à l'intention des partenaires du Réseau PRO et du SOERE PRO, utilisant des cas d'étude issus des dispositifs du Réseau PRO et du SOERE PRO. Cette formation a grandement contribué à la mise en place de la stratégie de traitement statistique des jeux de données de la banque de données.

6.3 Valorisation scientifique et technique des résultats

En vue d'être connus par la communauté scientifique et technique s'intéressant au recyclage agricole des PRO, les résultats du projet ont fait l'objet d'une valorisation scientifique et technique, sous forme de communications orales, de posters ou d'articles à large diffusion envers la communauté scientifique et technique. Des communications scientifiques ou techniques (posters et/ou communications orales) ont été présentées dans des colloques nationaux ou internationaux : 10^{èmes} Rencontres COMIFER-GEMAS à Reims, 11^{èmes} Rencontres COMIFER-GEMAS à Poitiers (Bell et al., 2013c ; Le Roux et al., 2013), 15^{ème} conférence internationale RAMIRAN à Versailles (Bell et al., 2013a), 18th *Nitrogen Workshop* à Lisbonne (Le Roux et al., 2014 ; Machet et al., 2014), congrès ORBIT [*Organic Resources and Biological Treatment*] à Gödöllő en Hongrie (Bell et al., 2014a), 20th *World Congress of Soil Science* à Jeju en Corée (Michaud et al., 2014a), colloque du GESSOL à Paris (Michaud et Heurtaux, 2015) ; d'autres communications ont été présentées lors de journées techniques, en groupes de travail et en séminaires : assemblées générales du RMT Fertilisation & Environnement à Paris, Comité stratégique du RMT Quasaprove à Paris, séminaire ACTA-INRA sur la polyculture-élevage à Toulouse (Bell et al., 2013b), atelier Matière Organique du Sitevi à Montpellier, Entretiens du Beaujolais à St Jean-d'Ardières, Groupe de travail « Méthanisation » du Pôle de compétitivité Industries et Agro-Ressources à Laon, Réseau MO de l'IFV à Nîmes, Groupe « Terre Avenir » à Estrées-Mons, Conférence sur la Gestion des matières organiques à Tilloy-les-Mofflaines, séminaire du projet européen INEMAD à Laon, réunions du Groupe PRO du COMIFER à Paris).

6.4 Organisation d'un colloque de restitution des travaux du projet

Une journée de restitution des travaux du projet Réseau PRO a été organisée à Paris le 5 décembre 2014 pour présenter les résultats aux divers partenaires du projet, aux représentants des ministères de l'écologie et de l'agriculture, de l'ADEME, de l'ANSES, des chambres d'agriculture, à des laboratoires, etc. L'affiche du programme de la journée de restitution, les présentations et les résumés sont disponibles en ligne sur le site du RMT F&E. La journée s'est achevée par une table ronde sur le thème « Quels chemins vers une meilleure valorisation des PRO en agriculture ? ». Si les résultats ont été largement diffusés au cours de la mise en œuvre du projet, les communications se poursuivent au-delà du projet en 2015, avec des communications orales et écrites sur les résultats du projet.

Conclusion et perspectives

Malgré la très grande quantité, la diversité et l'hétérogénéité des informations et données recensées et saisies, les travaux de caractérisation, de référencement, d'analyse et d'archivage ont pu être menés à bien de façon consensuelle par l'équipe projet. Le projet Réseau PRO aura ainsi contribué de façon majeure aux travaux français liés au recyclage agricole des PRO en constituant un groupe d'acteurs de la filière des PRO.

Les travaux conduits dans le Réseau PRO auront en effet permis (i) la constitution d'un réseau d'acteurs de la filière des PRO, (ii) l'établissement d'un état des lieux des essais étudiant les épandages agricoles de PRO en France, (iii) l'élaboration d'outils communs et consensuels entre partenaires du projet destinés à être utilisés par les acteurs de la filière (*i.e.* le guide méthodologique de conduite d'essais sur les PRO, la méthode de référencement des PRO et le système d'information intégrant la diversité des PRO et des situations agro-pédo-climatiques rencontrées en France), (iv) la mutualisation

de jeux de données entre partenaires, leur exploitation et leur utilisation pour consolider les outils développés au sein du RMT Fertilisation & Environnement, (v) un bilan des travaux mutualisés dans le réseau (ex. analyse descriptive de l'inventaire des essais étudiant les PRO, analyse critique des jeux de données mutualisés) et (vi) la diffusion des connaissances auprès des expérimentateurs et plus généralement tous les acteurs du recyclage agricole des PRO.

In fine, les travaux conduits dans le Réseau PRO seront utiles aux institutions recherchant des informations et données sur les PRO épandus en agriculture et sur leurs effets, et, contribueront à alimenter les législateurs et réglementateurs avec des jeux de données faisant l'objet de consensus. De façon plus générale, une meilleure connaissance de la valeur agronomique des PRO épandus en agriculture favorisera l'amélioration de leur acceptabilité sociale, en apportant des arguments complémentaires aux questions liées à la sécurité sanitaire et environnementale des pratiques agricoles.

C'est pourquoi les travaux du groupe Réseau PRO nécessitent d'être prolongés au-delà du présent projet, notamment pour poursuivre :

- (i) l'animation du réseau d'acteurs et d'essais,
- (ii) la fin du développement du SI et son alimentation avec les jeux de données mutualisés, recensés et intéressants d'acquérir sur les dispositifs existants ou mis en place à l'avenir,
- (iii) la valorisation et la communication des résultats et des acquis.

En outre, ce travail consensuel entre partenaires de la filière PRO produisant des outils communs et concertés devrait se poursuivre *via* le projet **PROtypo** (« **Typologies et valeurs agronomiques des PRO** : établissement des valeurs agronomiques et des typologies C et NPK basées sur les effets attendus au champ pour les produits résiduels organiques épandus sur le territoire français »), lauréat à l'appel à projets CASDAR IP 2014 et pour lequel des cofinancements sont recherchés (Heurtaux et al., 2014). En effet, ce projet a pour objectif de définir les valeurs agronomiques des PRO français en établissant les gammes de valeurs des paramètres agronomiques et en regroupant les PRO en **classes de comportement**, opérationnelles pour le conseil en agriculture, basées sur le potentiel amendement organique, les effets azotés et les valeurs fertilisantes phosphatée et potassique. Ces travaux aboutiront *in fine* à l'élaboration d'un **guide opérationnel de choix des PRO** représentatifs de la diversité des PRO épandus en France en termes d'origine (urbains, agricoles, agro-industriels) et de procédés de traitements (ex. sans, compostage, méthanisation, séchage, chaulage).

Références bibliographiques

ACTA-COMIFER, 2010. Valeur agronomique des produits d'origine non agricole recyclés en agriculture (PONARA) : Guide méthodologique pour l'expérimentation au champ. Coédition ACTA-COMIFER avec la participation de l'ITB, 71 pages. ISBN 2-85794-191-9.

ADEME, 2002. Inventaire national des essais agronomiques réalisés avec des matières organiques et minérales d'origines urbaine et industrielle. Collection « Données et références », n° 4239. ISBN 2-86817-653-4. 192 pages.

Bell A., Michaud A., De Chezelles E., Houot S., 2013a. Réseau PRO: analyzing the French context of field experiments assessing agronomic, environmental and sanitary impacts of organic residues recycled in agriculture, RAMIRAN congress, Versailles

Bell A., Heurtaux M., Michaud A., 2013b. Recyclage des effluents d'élevage en agriculture : contexte national de l'expérimentation au champ et mise en place d'outils et de références pour optimiser le recyclage dans le cadre du projet Réseau PRO, Colloque Les systèmes de polyculture – élevage dans les territoires, Toulouse

Bell A., Michaud A., Schaub A., Trochard R., Sagot S., Dumont S., Parnaudeau V., Leclerc B., Heurtaux M., Houot S., 2013c. Réseau PRO, référencement des Produits Résiduels Organiques

dans un système d'information mutualisé. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS, Poitiers.

Bell A., Cahurel J.-Y., Desmet P., Heurtaux M., Piraux F., Michaud A., 2014a. Evolution of vineyard soil organic matter contents after repeated inputs of various composts in different pedoclimatic contexts: statistical analysis of a field experiment network. ORBIT congress, Gödöllő, Hongrie.

Bell A., Michaud A., Schaub A., Trochard R., Sagot S., Dumont S., Parnaudeau V., Leclerc B., Heurtaux M., Koyao V., Diankha A., Belkacem M., Houot S., 2014b. Le référencement des PRO en base de données : méthode développée dans le cadre du Réseau PRO. Colloque de restitution des travaux Réseau PRO, Paris.

Bell A., Leclerc B., 2015. Inventaire français des essais au champ visant à évaluer les effets agronomiques, sanitaires et/ou environnementaux de Produits Résiduaire Organiques (PRO) de 1974 à 2012, 418 pages.

Bensch A., 2001. Systèmes de gestion de bases de données relationnelles. Support de formation, INAT, 25 sept.-2 oct. 2001.

Bodet C., 2014. Analyse des besoins des acteurs du terrain sur l'acquisition de nouvelles références sur les effets agronomiques et environnementaux de l'épandage des produits résiduaire en Alsace. Mémoire de fin d'études, ESA Angers, 72 pages.

Bravin M., Oustrière N., Edde A., Poïny-Toplan S., Michaud A., Ponce B., 2014. Accumulation dans les sols et phytodisponibilité des éléments traces en contexte d'apports répétés de PRO. Colloque de restitution des travaux Réseau PRO, Paris.

Damay N., Bell A., Balloy B., Bodet C., Bouthier A., Bravin M., Buffet M., Cahurel J.-Y., Decoopman B., Demarlé O., Duparque A., Duval R., Flenet F., Grall J., Guillouais S., Haudin C.-S., Heurtaux M., Houot S., Leclerc B., Michaud A., Ollivier D., Parnaudeau V., Revallier A., Sagot S., Schaub A., Trochard R., Valentin N., Valé M., Viard N., Vieuble-Gonod L., 2015. Guide méthodologique Réseau PRO : Mise en place d'un essai au champ pour l'évaluation agronomique, environnementale et sanitaire d'un Produit Résiduaire Organique. 282 pages.

Duparque A., Houot S., Cahurel J.-Y., Fortin E., Jousseau D., Caruel B., Goedtgheluck K., 2014. Valorisation des données du Réseau PRO : Evolution des stocks de carbone en systèmes de grandes cultures et en vigne, paramétrage et adaptation du modèle AMG. Colloque de restitution des travaux Réseau PRO, Paris.

Heurtaux M., Bell A., Michaud A., 2014. Réseau PRO : Objectifs, partenariats, principaux résultats et perspectives. Colloque de restitution des travaux Réseau PRO, Paris.

Le Roux C., Damay N., Chassine J.-M., Machet J.-M., 2013. Minéralisation de l'azote de la vinasse de sucrerie apportée à la betterave. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS, Poitiers.

Le Roux C., Machet J.-M., Damay N., 2014. Nitrogen mineralization of sugarbeet vinasses in interaction with catch crops, 18th N Workshop, Lisbonne.

Machet J.-M., Le Roux C., Damay N., 2014. AZOFERT®: a dynamic decision support tool for fertilizer N advice adapted for organic products and catch crops. 18th N Workshop, Lisbonne.

Michaud A., Bell A., 2014. Construire une séquence pédagogique consacrée aux conduites d'essais au champ, application à l'utilisation des produits résiduaire organiques (PRO), support pédagogique de la formation dispensée à l'EPN Rambouillet.

Michaud A., Heurtaux M., 2015. Réseau PRO : Réseau opérationnel d'essais au champ pour l'étude de la valeur agronomique et des impacts environnementaux et sanitaires des Produits Résiduaire Organiques recyclés en agriculture. Troisième colloque du programme GESSOL « Fonctions environnementales et gestion du patrimoine sol » du MEDDE, Paris.

Michaud A., Bell A., Heurtaux M., Houot S., 2014a. French national network devoted to ensure durable recycling of organic residues in agriculture: field experiment network, professional network and shared databases. 20th world congress of soil science, Korea.

Michaud A., Bell A., Maury O., Alexandre S., Dianka A., Belkacem M., Koayo V., Trochard R., Sagot S., Leclerc B., Cahurel J.-Y., Houot S., 2014b. Système d'information PRO. Colloque de restitution des travaux Réseau PRO, Paris.

Parnaudeau V., Cabanes O., 2014. Prise en compte des produits résiduels organiques dans l'outil de diagnostic des pertes azotées Syst'N®. Colloque de restitution des travaux Réseau PRO, Paris.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)