



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

IUT Nancy-Brabois
Génie Biologique Agro-Alimentaire



INRA
SCIENCE & IMPACT



Rapport de stage

Validation et analyse de données issues d'expérimentations sur le recyclage agricole de produits résiduels organiques dans différents contextes agropédoclimatiques

Laura FREUDENREICH

Tuteurs : Aurélia MICHAUD, Alix BELL
Enseignant référent : Sylvain MILLA
Stage de fin de DUT – 15 avril au 19 juillet 2013

Validation et analyse de données issues d'expérimentations sur le recyclage agricole de produits résiduels organiques

Comment mettre en évidence des différences entre traitements ?

Laura FREUDENREICH

Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à mes tutrices de stage, Alix BELL et Aurélia MICHAUD, qui m'ont permis d'effectuer mon stage dans un institut aussi renommé qu'est l'INRA. Leurs précieux conseils, la disponibilité et la patience dont elles ont su faire preuve ont largement contribué au très bon déroulement de ces trois mois.

L'achèvement de ce travail n'a été possible qu'avec l'aide de Valérie SAPPIN-DIDIER et Françoise WATTEAU qui m'ont fourni, en plus des éléments de base de mon travail, toutes les informations dont j'ai eu besoin au cours de mon stage.

Merci à Sylvain MILLA, mon professeur référent, pour son suivi régulier et son implication.

Pour ses enseignements sur la recherche bibliographique et ses conseils pour la rédaction d'un rapport, je tiens à remercier Jennifer THIRIET.

Cette page ne serait pas complète sans citer mon collègue, Pierre DESMET, qui a justifié sa présence en tant qu'expert statistique et via sa bonne humeur.

Enfin, je tiens à exprimer mes amitiés envers le département EGC et l'équipe « sol », notamment Vincent MERCIER pour la partie terrain et Annie MEURISSE pour le temps qu'elle m'a accordée. Je remercie tout particulièrement mes collègues de bureau Assiya, Sarah, Benjamin et les autres : l'ambiance chaleureuse qui a régné leur est entièrement due.

Sommaire

Introduction	1
1. Contexte et objectifs du stage	3
1.1. Présentation de l'INRA, de l'UMR EGC et de ses axes de recherche.....	3
1.2. Etat des connaissances sur les effets fertilisants et amendants du recyclage agricole des PRO et impacts environnementaux	3
1.3. Principes d'expérimentations en plein champ	4
1.4. Principe et objectifs du programme SOERE-PRO et du Réseau PRO	6
1.5. Objectifs du stage	7
2. Matériel et méthodes : caractéristiques des sites à l'étude et démarche statistique de validation des données.....	8
2.1. Dispositifs de la Bouzule et Couhins	8
2.1.1. Conduite des essais	8
2.1.2. Suivi réalisé sur les essais : compartiments et paramètres analysés.....	9
2.2. Fichier de saisie Excel.....	10
2.3. Traitement statistique des données	11
2.3.1. Vérifications préliminaires	12
2.3.2. Traitements statistiques	12
3. Résultats	14
3.1. Validation statistique des essais et des jeux de données et problèmes rencontrés	14
3.2. Mise en évidence de différences entre traitements.....	15
3.2.1. Teneurs en C_{org} , N et P dans le sol.....	15
3.2.2. Eléments traces métalliques (ETM) dans le sol.....	17
3.2.3. Données plantes : rendements, teneurs N, P, ETM	18
4. Discussion	21
4.1. Pertinence des choix expérimentaux.....	212
4.2. Valeur fertilisante des PRO	212
4.3. Impacts environnementaux des PRO sur les sols et les cultures	215
Conclusion	217
Bibliographie	29

Introduction

L'Homme, s'il a découvert l'agriculture, a rapidement remarqué que le sol pouvait servir de réceptacle « épurateur » à ses déchets organiques et ceux issus des élevages. L'apport de ces « déchets » semblait stimuler leur fertilité et améliorer la structure des sols (Mazoyer M, 2002). Ces pratiques ancestrales ont, pour une majeure partie des pays développés, été remplacées par les amendements minéraux et la fertilisation industrielle. Face à la diminution des réserves minérales, à l'augmentation du prix des engrais minéraux et au contexte réglementaire favorisant le retour au sol des matières organiques, le retour au recyclage des déchets organiques représente une alternative à l'utilisation d'engrais minéraux. Il nécessite d'être évalué précisément en termes de valeur agronomique et d'éventuels impacts environnementaux.

Regroupés sous le terme de produits résiduels organiques (PRO), les matières comme les boues de stations d'épuration, effluents d'élevages, digestats de méthaniseurs ou sous-produits industriels sont étudiés pour leurs effets sur l'environnement et les cultures. Le recyclage agricole de ces produits est actuellement estimé à 330 000 t/an. Leur épandage est encadré par les normes NF U42-001 et NF U44-051 (AFNOR) relatives à la plupart des engrais et amendements organiques, et la norme NF U44-095 pour les composts. Le décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 réglemente l'utilisation des boues d'épuration urbaine et l'arrêté du 3 avril 2000 celle des boues de papeterie. L'usage des PRO est cependant controversé (Renner, 2000). L'origine des matières entrant dans la composition des PRO fait qu'il existe un risque éventuel d'apport de contaminants organiques, biologiques et métalliques dans les sols récepteurs des produits épandus et donc un risque potentiel de contamination des cultures (Morel et Guckert, 1984 ; Schwartz C, 2001). Bien que leurs effets agronomiques soient confirmés, comme la participation à l'entretien du taux de matière organique du sol, de sa stabilité (Roldan et al., 1996) ou l'amélioration de la fertilité des sols (Houot, 2009), des questions restent en suspens. Quels avantages présentent-ils sur le long terme ? Quel est leur rôle dans la dynamique de la matière organique ? Comment sont transférés les éléments traces métalliques des PRO au sol et à la plante ? Quels sont ses effets réels sur le relèvement du taux de matière organique ? Existe-t-il un risque concernant la qualité des aliments ?

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire d'évaluer les effets de l'apport de PRO au champ, dans le cadre d'expérimentations conduites selon des pratiques agricoles locales et/ou maximisant les effets potentiels. Pour cela, le SOERE PRO (Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement sur les PRO) a été mis en place à en 2010. Cet observatoire de recherche est un réseau de sites expérimentaux au champ de longue durée conduits en réseau et dont les données seront mutualisées. Ces sites, à l'échelle de la parcelle, permettent de mesurer depuis plus de 10 ans pour certains l'évolution des différents compartiments de l'agrosystème soumis à épandage de PRO, d'effectuer des bilans et de développer des modèles prévisionnels des effets des épandages de PRO.

Le stage réalisé au sein de l'équipe sol de l'Unité Mixte de Recherche Environnement et Grandes Cultures du centre de Versailles-Grignon s'inscrit dans ce programme SOERE PRO. Il a pour objectif la validation statistique et agronomique de données issues d'expérimentations sur le recyclage agricole de PRO sur le long terme dans différents contextes pédoclimatiques. Il s'agit dans un premier temps de collecter et mettre en forme des données issues de deux sites expérimentaux, La Bouzule et Couhins, puis de les valider statistiquement afin de dégager des différences entre les traitements étudiés.

En production végétale, l'environnement pédoclimatique correspond à l'ensemble des conditions favorables ou contraignantes associées au sol et au climat impactant sur la croissance végétale. Ses effets sur les cultures ne sont prévisibles que dans une certaine mesure. Parmi les facteurs agro-environnementaux à prendre en compte, on reconnaît les paramètres pédologiques comme les propriétés physico-chimiques, le drainage et la profondeur du sol, mais aussi la topographie, qui comprend la pente ou l'exposition, et enfin le climat.

Une contextualisation du stage et son intégration au sein des axes de recherche de l'INRA fera l'objet d'une première partie, avec notamment une partie bibliographique sur les effets fertilisants de l'épandage de PRO. Après avoir détaillé les différents outils de travail utilisés et les méthodes employées, les résultats seront présentés du point de vue statistique et agronomique. Une discussion tendra à expliquer les résultats obtenus et à exprimer les différents problèmes rencontrés.

1. Contexte et objectifs du stage

1.1. Présentation de l'INRA, de l'UMR EGC et de ses axes de recherche

En 1946, au sortir de la Seconde Guerre Mondiale, la France est appauvrie et connaît une pénurie alimentaire. Incapable de nourrir sa population, le pays est dans la nécessité d'augmenter sa production. L'INRA, l'Institut National de la Recherche Agronomique, naît de ce besoin d'intégrer les sciences et technologies nouvelles à l'agriculture française. Lorsque le pays commence à produire en excès et à exporter, l'institut, sous la tutelle de l'Etat, diversifie ses axes de recherche. Il ne s'agit plus uniquement de produire plus, mais de produire mieux. Organisme de recherche publique, il est aujourd'hui le premier institut de recherche agronomique européen, et deuxième mondial en nombre de publications. Il compte 8504 permanents dont des chercheurs, ingénieurs et techniciens. Représenté au niveau national, il dispose de 17 centres dédiés à la recherche finalisée dans les domaines de l'alimentation, l'agriculture et l'environnement.

Le centre de Versailles-Grignon est composé de deux sites, le principal à Versailles même et le deuxième sur le campus d'AgroParisTech à Thiverval-Grignon. Biologie végétale, agroécologie, alimentation, économie et sciences sociales sont les thématiques principales du centre. L'Unité Mixte de Recherche « Environnement et Grandes Cultures » (UMR EGC) du site de Grignon a pour objectif la description et la modélisation des agrosystèmes du nord de l'Europe avec la prise en compte des facteurs environnementaux. L'UMR est qualifiée de mixte car elle est sous la tutelle de deux organismes, l'INRA et AgroParisTech. Elle se décompose en trois équipes, Plante, Bio-atmosphère et Sol. Cette dernière travaille sur plusieurs axes de recherches : les pesticides, la spatialisation des sols et leurs propriétés, et enfin l'impact des apports au sol de produits résiduels organiques (PRO). La thématique des PRO fait l'objet de ce stage.

1.2. Etat des connaissances sur les effets fertilisants et amendants du recyclage agricole des PRO et impacts environnementaux

L'épandage agricole des PRO se justifie par leur valeur fertilisante et amendante, c'est-à-dire par un retour au sol d'éléments nutritifs pour les cultures (notamment l'azote et le phosphore) et de matière organique.

Les éléments nutritifs sont naturellement présents dans le sol sous différentes formes : minérales (cations, anions), organiques et organo-minérales (complexe argilo-humique). En termes de nutrition des plantes, on distingue les éléments majeurs, tels que l'azote (N) ou le phosphore (P), des oligo-éléments indispensables à la croissance des plantes, présents en plus faible quantité (éléments traces) en comparaison avec les éléments majeurs. Ils sont au nombre de sept, et leur caractère essentiel à la croissance des végétaux est établi depuis les années 1930 (Adriano, 2001) (Tableau 1). Au-delà d'un certain seuil de concentration, certains de ces éléments nutritifs à l'état de traces (éléments en traces métalliques - ETM) peuvent se révéler toxiques pour les cultures, et deviennent alors des contaminants (ex. Cu, Zn).

La teneur totale des éléments fertilisants et/ou potentiellement contaminants, que ce soit dans le sol ou dans un PRO, ne donne qu'une indication partielle de leur fraction disponible au prélèvement par la plante. C'est pourquoi on s'intéresse également à la disponibilité, ou biodisponibilité, de ces éléments pour les organismes. Au-delà de la teneur totale des éléments majeurs ou oligo-éléments présente dans le sol sous forme plus ou moins disponible au prélèvement par un organisme, il est ainsi préférable de considérer la fraction (bio)disponible des éléments. Celle-ci correspond à la fraction d'un élément disponible au prélèvement par un organisme. Elle résulte de processus dynamiques comprenant un ensemble de processus physico-chimiques aboutissant au passage en solution de l'élément, et de processus physiologiques propres à l'organisme préleveur (Peijnenburg et Jager 2003 ; Lanno et al.

2004). Dans le cas particulier des cultures, on parle de phytodisponibilité, c'est-à-dire de la fraction d'un élément disponible au prélèvement par les racines.

Les propriétés physico-chimiques du PRO épandu et du sol récepteur influent sur la disponibilité des éléments fertilisants et des potentiels contaminants, en particulier le pH, la texture, la teneur en carbone organique et les teneurs initiales en éléments (totales et disponibles). Les processus biologiques microbiens et racinaires agissent également sur la disponibilité des éléments en générant des formes minérales assimilables par les racines, par exemple via des processus de nitrification, ou par sécrétion d'enzymes telles que les phosphatases.

Tableau 1 : Rôle des principaux éléments nutritifs et oligo-éléments impliqués dans la croissance végétale (d'après V. Genot et al., 2007 ; Adriano, 2001)

	Élément	Rôles
Éléments majeurs	C, carbone	Élément constitutif de la matière organique
	N, azote	Élément constitutif des organismes vivants (protéines...)
	P, phosphore	Rôle métabolique : échanges énergétiques ATP/ADP Rôle plastique : constitutif de la paroi cellulaire
	K, potassium	Absorption et transport de l'eau Activation enzymatique
	Ca, calcium	Neutralisation des anions minéraux et organiques Diminution de la toxicité de certains éléments Consolidation des parois cellulaires
	Mg, magnésium	Constitution de la chlorophylle Synthèse des acides aminés Assimilation et transport du P
Oligo-éléments	Fe, fer	
	Mn, manganèse	
	Zn, zinc	Rôle métabolique, cofacteurs dans la constitution et le fonctionnement d'enzymes, catalyseurs ou inhibiteurs de réactions biochimiques.
	Cu, cuivre	
	Mo, molybdène	Fournis à des doses faibles (risque de toxicité)
	B, bore	
Cl, chlore		

La valeur d'amendement organique d'un PRO se traduit par la capacité à maintenir voire à rehausser le stock de matière organique du sol avec des apports répétés dans le temps. Cet effet amendant des PRO est connu et confirmé par de nombreuses études sur les boues ou les composts, mais une augmentation de ce stock sur le moyen terme n'est mesurable que lorsque les doses d'apport des PRO testées sont importantes (Houot et al., 2007). L'apport de matière organique par les PRO peut également permettre d'améliorer la stabilité du sol. En effet, le lien entre matière organique et stabilité du sol est aujourd'hui reconnu par de nombreux auteurs (Albrecht et al, 1992 ; Chaney & Swift, 2006). Les PRO seraient donc un moyen efficace pour garantir une moindre sensibilité aux risques de battance et d'érosion.

De par leur origine, les PRO comme les boues sont des vecteurs potentiels de contaminants métalliques (ETM). Il a été observé une augmentation proportionnelle des teneurs en ETM dans l'horizon d'incorporation des PRO avec les doses de PRO épandues (Chang et al., 1987), avec une tendance à l'accumulation des ETM dans l'horizon superficiel des sols. Pour autant, malgré cette augmentation en ETM, les teneurs restent dans les ordres de grandeur du fond pédogéochimique (e.g. expérimentation de Werner & Warmusz, 1997) et varie en fonction des dosages et du type de sol.

1.3. Principes d'expérimentations en plein champ

L'expérimentation est le fait de provoquer un phénomène dans le but d'en étudier les conséquences (Vilain, 1999). Il s'agit de définir des hypothèses sur le phénomène ainsi que sur les facteurs l'influençant.

L'expérimentation de plein champ consiste donc à tester les effets de ce(s) facteur(s), appelé(s) facteur(s) étudié(s) sur les différents compartiments de l'agrosystème que l'on a choisi de suivre (sol, plante, eau voire air). De manière générale, pour un facteur étudié donné (par exemple la dose d'apport d'un PRO), on teste plusieurs niveaux (par exemple 5t/ha, 10t/ha et 15t/ha).

On définit un traitement par la combinaison des différents niveaux des facteurs étudiés sur l'essai expérimental.

L'agronomie est avant tout une science de terrain : les effets qu'auront divers facteurs tels que le travail du sol ou la culture en place ou l'apport d'un PRO sur le court et long terme sont difficiles à prédire car ils dépendent du contexte pédoclimatique. L'expérimentation de plein champ permet de prendre en compte le contexte environnemental. Il est possible ensuite de confronter les résultats obtenus sur le terrain avec des résultats acquis en laboratoire en conditions contrôlées.

L'expérimentation de plein de champ étant, contrairement à l'expérimentation en laboratoire, dépendante des conditions environnementales, peut présenter certains inconvénient. En effets, des contraintes météorologiques par exemple (gel, sécheresse) peuvent affecter les résultats de rendement de façon à ce qu'il ne soit pas possible de différencier les effets de la météo de ceux des traitements étudiés sur ce paramètre.

La mise en place d'un réseau d'essais a l'avantage d'étudier en plus les effets de divers contextes pédoclimatiques.

En fonction des hypothèses que l'on cherche à tester, un dispositif est mis en place afin de les confirmer ou de les rejeter. Pour cela, les traitements étudiés doivent être comparables entre eux, et la conduite des expérimentations (travail du sol, phytosanitaires) doit être identique pour tous les traitements étudiés et choisie de manière à ne pas entraîner un effet non désiré.

Différents dispositifs expérimentaux peuvent être mis en place (dispositif en blocs, carré latin, criss-cross, etc.) pour conduire l'expérimentation au champ. Ces dispositifs expérimentaux doivent répondre à deux principes (Vilain, 1999) :

- la répétition des traitements : au nombre de trois minimum pour pouvoir effectuer des traitements statistiques valides. Ce nombre est souvent limité par les moyens financiers et humains dont dispose l'expérimentateur.
- la répartition aléatoire des traitements, ou « randomisation » au sein du dispositif : chaque répétition de chaque traitement doit être affectée à une unité expérimentale (ou parcelle élémentaire) de façon aléatoire. En effet, du fait de l'hétérogénéité du terrain expérimental, les différences entre deux parcelles élémentaires voisines peuvent être moins importantes qu'entre deux parcelles éloignées. Si les répétitions d'un même traitement étaient situées intentionnellement côte à côte, il serait difficile d'attribuer les différences de résultats observées entre traitements à la nature des traitements ou à l'hétérogénéité du terrain. Cette répartition permet donc de limiter les biais expérimentaux.

Le choix du type de dispositif se fait en fonction des contraintes matérielles (temps disponible, budget, contraintes du terrain...). Le principal type de dispositif utilisé en agronomie est le plan en blocs aléatoires complets car il permet de faciliter les interventions culturales et de prendre en compte les hétérogénéités du terrain. Il est constitué de blocs, chaque bloc correspondant à une surface de terrain homogène et composés d'unités expérimentales, les parcelles élémentaires. Chaque bloc reçoit une seule et unique fois chaque traitement étudié distribué aléatoirement dans les parcelles élémentaires. Il y a autant de blocs que de répétitions de traitement.

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité du terrain et d'en limiter les effets, les blocs sont disposés perpendiculairement au gradient d'hétérogénéité observé ou supposé (ex : pente, gradient de fertilité ...). Cela permet aussi d'avoir des blocs légèrement différents entre eux.

1.4. Principe et objectifs du programme SOERE-PRO et du Réseau PRO

Au niveau national, de nombreux organismes ont mis en place de manière indépendante des essais sur les effets de l'épandage agricole de PRO. Le but était d'étudier les effets de leur recyclage dans des conditions proches des pratiques agricoles courantes, cela en fonction des effets attendus au champ. Ainsi, plus de 400 essais ont été inventoriés de 1973 à 2012 en France dans le cadre du projet Réseau PRO¹ (Bell et al. 2013). Ceux-ci étaient de courte, moyenne ou longue durée, et souvent dédiés à un effet attendu au champ. Environ 50 % des essais conduits pour évaluer la fertilisation azotée à court terme. Quelques essais de longue durée avaient permis de faire des observations détaillées à l'échelle de la parcelle, ces essais encore conduits actuellement sont principalement intégrés au SOERE PRO. Ils visaient à apporter des réponses scientifiques aux effets de la pratique du recyclage agricole des PRO.

Le Système d'Observation et d'Expérimentation de Recherche en Environnement sur l'épandage à long terme de produits résiduels organiques, le SOERE-PRO, a été mis en place en 2010 par l'INRA. Il a pour vocation d'effectuer des bilans complets à l'échelle de la parcelle des effets de l'épandage de et de développer des modèles simulant l'évolution des agrosystèmes soumis à épandage. Ainsi, il permettra d'apporter des réponses scientifiques concernant les effets du recyclage agricole des PRO en grandes cultures en termes de valeur amendante, fertilisante, et sur les éventuels apports et devenir des contaminants minéraux, organiques et biologiques.



Figure 1 : Carte des sites SOERE-PRO en France (INRA, 2011)

Le SOERE-PRO est aujourd'hui un réseau de 3 sites principaux instrumentés (Qualiagro en Ile de France, plateforme de Colmar en Alsace, EFELE en Bretagne) et 2 sites associés (La Bouzule en Lorraine, Couhins en Aquitaine) (Figure 1). Les trois sites principaux testent l'apport d'effluents d'élevage, composts urbains et boues urbaines par rapport à un témoin sans apport organique. Pour les deux sites associés, La Bouzule et Couhins, des apports de longue durée ont été recensés, de l'ordre de dix ans, mais les épandages ont pris fin et les PRO testés n'étaient pas identiques entre les sites. L'intérêt de ces essais associés pour le SOERE-PRO est d'étudier la résilience de l'agrosystème après la fin des apports de PRO, c'est-à-dire leur aptitude à retrouver un équilibre et donc à rester fertiles.

Les sites expérimentaux du SOERE PRO sont des dispositifs en blocs aléatoires complets conduits de façon coordonnée selon les pratiques agricoles locales.

Un suivi systématique est réalisé sur les compartiments de l'agrosystème (PRO, sol, plante, eau) avec le suivi des propriétés physico-chimiques, des rendements, des éléments minéraux et organiques (majeurs, oligo-éléments et éventuels contaminants). Les suivis concernent par exemple la dynamique de la matière organique, le devenir des micropolluants organiques (œufs d'helminthes), minéraux (cadmium, manganèse) et biologiques (germes pathogènes, vecteurs de maladies) dans les sols. Il pourra permettre la mise en place d'outils prévisionnels sur l'évolution des sols.

En complément du SOERE PRO, le Réseau PRO a également été constitué. Il a été mis en place en partenariat avec les acteurs de la filière de gestion des PRO qui conduisent des sites expérimentaux au champ.

¹ Réseau PRO (projet CasDAR/ADEME 2011-2013) : réseau opérationnel de sites expérimentaux au champ conduits avec les acteurs de la filière de gestion des PRO (instituts techniques, chambres d'agriculture, établissement d'enseignement agricole/agronomique, instituts de recherche, etc.)

Le Réseau PRO a été initié en 2011 par l'Association de Coordination Technique Agricole (ACTA) et l'INRA. Il a été mis en place en partenariat avec les acteurs de la filière de gestion des PRO. Son objectif est (i) d'inventorier les essais de plein champ conduits par tout organisme appartenant à la filière de gestion des PRO (e.g. instituts techniques agricoles, chambres d'agriculture, organismes de recherche, établissement d'enseignement agricole) et (ii) de mutualiser, gérer et mettre à disposition les données acquises sur les essais préalablement inventoriés au sein d'un système d'information (SI)² national.

Le Réseau PRO est un réseau d'essais dans lequel s'imbriquent les essais du SOERE PRO. En effet, les essais recensés dans le cadre du Réseau PRO sont des essais conduits par des instituts de recherche tels que ceux du SOERE PRO mais également des essais conduits par des chambres d'agriculture ou des instituts techniques, de courte, moyenne ou longue durée, portant sur une ou plusieurs thématique d'étude des PRO et conduits dans divers contexte cultureux (viticulture, grande culture, etc.) Ce réseau permet surtout d'élargir la diversité des contextes testées en France par rapport au SOERE PRO (multiplicité des PRO apportés et des contextes agro-pédo-climatiques rencontrés). Après homogénéisation des pratiques et validation des données acquises, le réseau permettra la mise en place d'un guide méthodologique de conduite pour les futurs essais implantés sur le territoire et d'alimenter des outils d'aide à la décision pour un usage concret des PRO en agriculture.

Les données acquises dans le cadre du SOERE PRO sont donc destinées à être formatées dans des fichiers de saisie mis au point dans le cadre du Réseau PRO. Ensuite, les données mises en forme seront mises en commun entre les partenaires dans des bases de données communes aux deux réseaux d'essais.

1.5. Objectifs du stage

Ces deux programmes se rejoignent sur un objectif commun : la création d'un système d'information commun entre les partenaires des deux réseaux d'essais. Il apparaîtra ici sous forme d'une ou plusieurs bases de données exploitables et consultables par interface web. Il permettra de fournir aux membres du SOERE PRO et du Réseau PRO des informations sur la qualité statistique des données et les caractéristiques de l'essai de manière lisible et immédiate.

Le stage a pour objectifs de (i) saisir les données issues de 4 dispositifs du SOERE PRO, l'un implanté à la Bouzule et les trois autres implantés sur Couhins, (ii) valider au niveau statistique les jeux de données acquis sur ces dispositifs et (iii) engager la compréhension des effets observés sur ces dispositifs.

Pour cela, les données du site de la Bouzule et des trois sites de Couhins seront collectées puis mises en forme dans un fichier de saisie Excel.

² SI : « ensemble organisé de ressources permettant la collecte, le stockage, la structuration, la modélisation, la gestion, la manipulation, l'analyse, le transport, l'échange et la diffusion des informations (textes, images, sons, vidéo...) au sein d'une organisation. » (Servigne, 2013).

2. Matériel et méthodes : caractéristiques des sites à l'étude et démarche statistique de validation des données

2.1. Dispositifs de la Bouzule et Couhins

La Bouzule et Couhins comptabilisent quatre dispositifs au total. Les données ont pu être saisies pour tous les dispositifs, mais la validation statistique n'a été complète que pour deux dispositifs, La Bouzule et Ambarès. Seuls ces deux derniers seront détaillés dans la suite du rapport.

2.1.1. Conduite des essais

La Bouzule est un domaine expérimental de l'INRA situé à Champenoux, en Meurthe-et-Moselle. L'essai intégré au SOERE PRO a débuté en 1997. Il avait pour vocation de déterminer les impacts écotoxicologiques et environnementaux de l'épandage de PRO. L'essai est un dispositif en blocs aléatoires complets. Il compte dix traitements dont deux témoins en fertilisation sans apport de PRO, avec quatre répétitions, soit quarante parcelles élémentaires de 40m² disposées sur quatre blocs, comme présenté en Figure 2. Le sol est argileux et neutre, et le labour est effectué dans le sens de la longueur des parcelles.

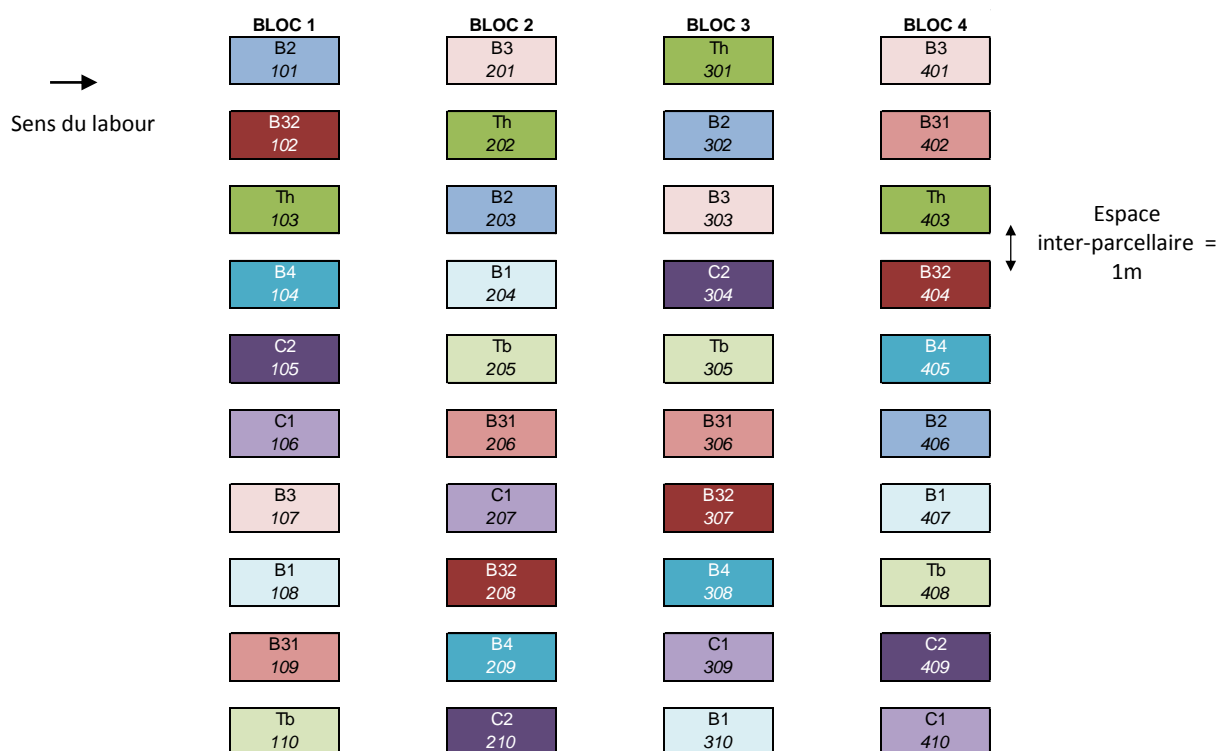


Figure 2 : Dispositif en blocs de La Bouzule. Les traitements étudiés sont :

B1 : Boue de station urbaine peu deshydratée ; **B2** : Boue de station urbaine deshydratée ; **B3** : Compost de boue de station urbaine et déchets verts (DVB) ; **B31** : DVB dopée en polluants organiques (CTO) ; **B32** : DVB dopée en polluants métalliques (ETM) ; **B4** : Boue de papeterie ; **C1** : Cendres de combustion ; **C2** : Compost d'ordures ménagères (OMR) ; **Tb** : Témoin à fertilisation minérale basse ; **Th** : Témoin à fertilisation minérale optimale.

Les PRO épandus sont au nombre de huit. Le traitement B1 est une boue de station d'épuration urbaine (STEP) qui n'a subi qu'une deshydratation partielle. La boue B2 est une boue de STEP ayant subi une deshydratation totale. Les traitements B3, B3.1 et B3.2 sont issus du compostage d'une même boue de STEP en mélange avec des déchets verts. On notera que le compostage de ces 3 produits s'est effectué de façon individuelle. C'est pourquoi, malgré un procédé de compostage et des matières entrantes identiques, on trouvera des différences de compositions physico-chimiques entre ces 3 PRO. Après la phase de compostage, B3.1 et B3.2 ont été dopés respectivement en polluants organiques (CTO) et

métalliques (ETM). Le traitement B4 est une boue industrielle de papeterie. Les traitements C1 et C2 sont respectivement des cendres de combustion de charbon et un compost d'ordures ménagères urbaines. Toutes les parcelles élémentaires recevant les traitements organiques sont complétées par une fertilisation minérale basse en azote, et ponctuellement en phosphore et potassium. Deux traitements à fertilisation minérale azotée basse (Tb) et haute (Th) servent de témoins, avec apport de phosphore et potassium de manière ponctuelle.

Les cultures suivies sont de type grandes cultures à dominante de céréales (maïs, blé). Sur les 15 années d'expérimentation, quatre épandages de PRO ont été effectués avant semis en mai et en octobre 1997, septembre 1998 et avril 2002. Les doses épandues correspondaient à celles de la législation en vigueur à l'époque, soit 10t MS (masse sèche) / ha ou 40 kg MS / parcelle élémentaire. Un labour superficiel à 20 cm avant les cultures a permis d'enfouir les résidus de cultures et les PRO.

Le site de Couhins, situé à Bordeaux en Aquitaine, est constitué de trois dispositifs mis en place en 1974 et arrêtés en 2001 : Ambarès, Saint-Denis-de-Pile et Louis Fargue. Nous ne présenterons ici que le site d'Ambarès. L'essai avait pour objectif l'étude du transfert sol-plante des éléments traces.

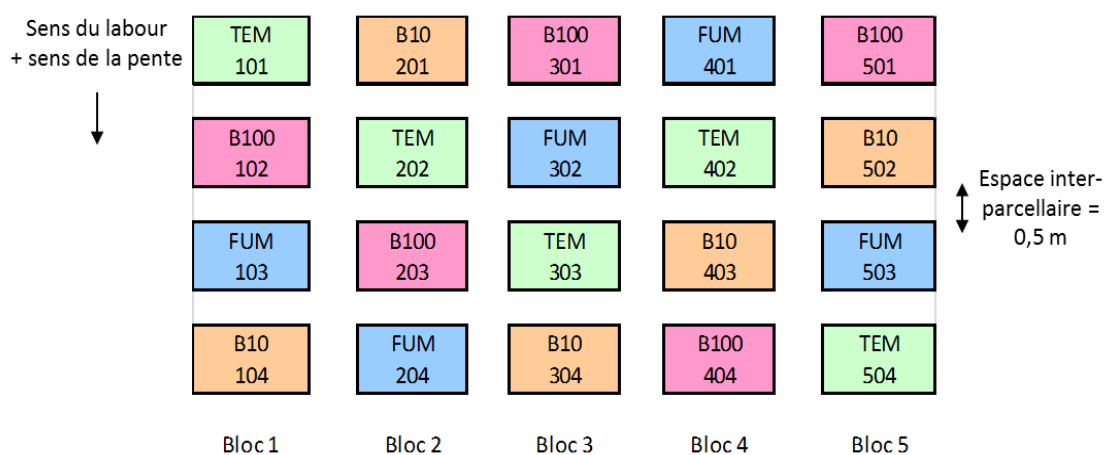


Figure 3 : Dispositif en blocs d'Ambarès sur le site de Couhins. Les traitements étudiés sont : TEM : témoin ; FUM : fumier de bovins ; B10 : boue de station urbaine à 10t masse sèche (MS) / ha ; B100 : boue de station urbaine à 100t MS / ha

Les traitements sont de quatre types, dont un témoin à fertilisation minérale et deux PRO, avec cinq répétitions, soit 20 micro-parcelles de 18 m² réparties en cinq blocs (Figure 3). Le climat est de type océanique et le sol est calcaire à pH acide. Du fumier de bovins est épandu à mesure de 10t MS / ha / an, et de la boue de station d'épuration est épandue à deux niveaux de raisonnement, à 10t MS/ha/an (notée B10) et à 100t MS / ha / 2 ans (notée B100). Une pente existe dans le sens de la largeur des parcelles, et le labour est réalisé dans le sens de la pente. L'espace inter-parcellaire est de 50 cm dans les lignes et les colonnes.

2.1.2. Suivi réalisé sur les essais : compartiments et paramètres analysés

Des analyses dans les différents compartiments (sol, plantes et PRO) ont été effectuées chaque année dans chaque parcelle élémentaire. Les analyses sont décrites dans le Tableau 2.

Les prélèvements de sol sont généralement effectués sur l'horizon superficiel, soit entre 0 et 20 cm. Ponctuellement, les horizons plus profonds, entre 30 et 50 cm et entre 80 et 100 cm, sont prélevés pour obtenir des informations concernant la lixiviation de l'azote.

Tableau 2 : Paramètres analysés sur chaque parcelle élémentaire et dans les différents compartiments (MS : masse sèche ; MB : masse brute ; 11%h : 11% d'humidité ; qx : quintaux)

Compartiment	Site	Paramètres étudiés	Unité	Fréquence de prélèvement
PRO	Bouzule	Majeurs : C organique, N total, P ₂ O ₅ Olsen, K ETM :	g.kg ⁻¹ MS 105°C mg.kg ⁻¹ MS 105°C	Avant chaque épandage
	Ambarès	Majeurs : C organique, N total, P ₂ O ₅ , K, Fe ETM : Mn, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr	g.kg ⁻¹ MS 105°C mg.kg ⁻¹ MS 105°C	Avant chaque épandage
Sol	Bouzule	pH Granulométrie : limon, sable, argile Majeurs : C organique total, N total, P ₂ O ₅ Olsen ETM : Fe, Cu, Ni, Pb, Zn	Sans unité % MS 105°C g.kg ⁻¹ MS 105°C mg.kg ⁻¹ MS 105°C	Début + fin de l'essai Début de l'essai + après épandage
	Ambarès	pH Majeurs : P total, K, C organique ETM : Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni, Pb	Sans unité g.kg ⁻¹ MS 105°C mg.kg ⁻¹ MS 105°C	Après épandage
Végétaux	Bouzule	Rendement	Colza : qx 11%h /ha Blé : qx MB/ha Maïs : t MB/ha	Après récolte Après récolte Après récolte + après ensilage
	Ambarès	Rendement Majeurs : N Kjeldahl, P total, K ETM : Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni, Pb	Maïs : qx MS 105°C /ha g.kg ⁻¹ MS 105°C mg.kg ⁻¹ MS 105°C	Stades 10-12 feuilles, 50% floraison mâle, récolte

2.2. Fichier de saisie Excel

Afin de mutualiser les données acquises sur les différents essais recensés dans le cadre du Réseau PRO, il est nécessaire de saisir sous un même format les informations relatives à la conduite des sites expérimentaux et à l'acquisition des données. La saisie des informations et des données des sites expérimentaux dans des fichiers de saisie suivant un modèle type, prédéfinis par le Réseau PRO, permet la bonne mise en forme et donc l'exploitation simplifiée des données mutualisées.

Ce fichier de saisie permet donc la mise en forme des données acquises sur différents types de dispositifs quelle que soit la thématique étudiée sur le dispositif, allant d'un essai sans répétition en bande à un essai en blocs aléatoire complets. Il permet un enregistrement détaillé des différents paramètres et compartiments suivi sur l'essai. Ce fichier de saisie se présente sous forme d'un classeur Excel composé de plusieurs onglets, regroupés par thématiques, comme répertorié en Tableau 3. Excel a pour avantage d'être accessible à tous et facile à prendre en main.

Les données saisies proviennent des sites d'expérimentation, communiquées par les responsables ou référencées dans des rapports. La plupart du temps, il est nécessaire de les remettre en forme avant de les intégrer au fichier de saisie pour les convertir aux bonnes unités, ou renommer les parcelles élémentaires figurant sur les plan des dispositifs. Les paramètres analysés dans chaque compartiment sont renseignés en colonne de quatre manières, via :

- leur dénomination (Azote du sol)
- la méthode d'analyse de l'échantillon avec la norme associée (méthode Dumas, norme NF ISO 10694)

- l'unité (g.kg⁻¹ MS 105°C)
- le laboratoire d'analyses (LAS Arras).

Tableau 3 : Contenu du fichier de saisie Excel

Onglets	Informations fournies
Informations générales sur l'essai	Contexte, objectifs de l'essai, données météorologiques
PRO étudiés	Description des PRO étudiés : origine, dénomination, composition, traitements et conditions de stockage
Dispositif	Facteurs étudiés, description des traitements, dénomination et traitements appliqués sur les parcelles élémentaires
Itinéraire technique	Description de l'itinéraire technique : fertilisation organique et minérale, phytosanitaires, travail du sol, succession culturale, irrigation, autres amendements.
Données PRO, sol, plantes, intrants, eau, air, incubations	Saisie des données en renseignant : la date et l'échelle de prélèvement (e.g. traitement, parcelle élémentaire), paramètres étudiés, méthodes d'analyse du paramètre, unités, saisie des valeurs en leur associant un statut (e.g. valeur mesurée, valeur aberrante, valeur moyennée sur le traitement)

Outre la saisie des données dans un fichier de saisie il est nécessaire de les valider statistiquement afin d'apporter des informations sur la qualité statistique des données et de l'essai pour les variables suivies.

2.3. Traitement statistique des données

Celui qui exploite des résultats peut émettre *a priori* des hypothèses quant à l'efficacité des traitements, visuellement ou via la comparaison de moyennes.

Pour l'exploitation statistique des données d'un dispositif en blocs aléatoire complet, on définit la valeur mesurée pour un paramètre donné, enregistrée pour le traitement *i* du bloc *j* suivant le modèle suivant :

$$\text{Valeur mesurée} = \text{effet moyen} + \text{effet traitement } i + \text{effet bloc } j + \text{effet résiduel}$$

L'effet moyen correspond à l'effet moyen du dispositif expérimental. L'effet résiduel est la partie que l'on ne peut contrôler dans le dispositif (une hétérogénéité non prise en compte car non soupçonnée, par exemple). Il est donc nécessaire d'évaluer si cet effet résiduel est trop important avant de pouvoir conclure sur les résultats de l'essai. On calcule ainsi pour chaque valeur mesurée l'effet résiduel ou le résidu. Dans le cadre du Réseau PRO, il a été choisi d'utiliser préférentiellement le logiciel Statbox Agri pour valider les données statistiquement. Adapté aux expérimentations agronomiques, et donnant des sorties facilement interprétables, il constitue un outil rapide et efficace pour mettre en avant des différences entre traitements et juger la qualité des données. Il est cependant nécessaire de ne pas se limiter aux sorties des logiciels statistiques. En effet, une interprétation fine et un retour aux données permet d'intégrer une interprétation agronomique des résultats, ne se basant pas uniquement sur une analyse purement statistique.

La démarche statistique suivie pour la validation des données de La Bouzule et d'Ambarès est présentée dans les paragraphes suivants. Elle consiste en une analyse de de variances, ou ANOVA pour "ANalysis Of Variance". Une ANOVA à un facteur en dispositif en blocs est réalisée pour chaque paramètre et chaque date de prélèvement.

2.3.1. Vérifications préliminaires

A l'aide de Statbox, on réalise les vérifications préliminaires nécessaires à l'application de l'ANOVA : l'indépendance des résidus, la normalité des résidus, l'homogénéité des variances, et l'absence d'interaction entre les traitements et les blocs. On cherche également à identifier les éventuelles valeurs suspectes pouvant aboutir à des résultats erronés.

L'indépendance des résidus est vérifiée grâce à une cartographie des résidus. La cartographie permet d'identifier s'il existe des résidus du même ordre de grandeur concentrés dans des zones identifiées du dispositif expérimental. Si cela est le cas, il est possible qu'un gradient influençant le paramètre étudié existe. Dans le cas contraire, on peut conclure à l'indépendance des résidus.

Dans le logiciel Statbox, la normalité de la distribution des résidus est appréciée par les coefficients de Pearson : coefficient de symétrie dont la valeur doit s'approcher de 0, et coefficient d'aplatissement dont la valeur doit s'approcher de 3. Les deux doivent avoir une p-valeur supérieure à 5 % pour ne pas rejeter l'hypothèse de normalité, ce qui correspond au seuil de significativité. Un histogramme des résidus permet une approche visuelle de leur distribution et permet également de rejeter ou d'accepter l'hypothèse de loi normale. Dans le cas où les résidus ne suivraient pas une loi normale, il est possible d'effectuer une transformation logarithmique des données brutes et d'effectuer de nouveau les calculs et vérifications préliminaires sur la variable transformée.

Un test de Grubbs permet d'autre part de vérifier la présence ou non de résidus suspects, et donc de valeur mesurée aberrante dans les données. Lorsque le test identifie une valeur statistiquement aberrante, la valeur est supprimée et remplacée qu'à la seule condition que la valeur semble également suspecte d'un point de vue agronomique.

Il est également nécessaire de vérifier que les variances des blocs entre elles et les variances des traitements en elles sont égales. Ceci est vérifié par un test de Bartlett (ou test du χ^2). Lorsque l'hypothèse H_0 d'égalité des variances n'est pas rejetée, on confirme que les données sont comparables entre elles, qu'elles sont du même ordre de grandeur.

Le test de Tukey informe sur la significativité d'une interaction « bloc x traitement ». Si l'interaction est mise en évidence, il est possible que l'un des blocs soit très différent des autres. Une interaction peut également traduire un gradient intra-bloc, visible sur la cartographie des résidus. Dans ces 2 cas, on peut procéder à l'élimination du bloc identifié et effectuer les vérifications préliminaires de nouveau. Lorsque l'ensemble des conditions est remplie, et en l'absence de résidu suspect, l'analyse de variance est effectuée.

2.3.2. Traitements statistiques

L'écart-type résiduel (ETR) traduit la précision de l'essai. Plus il est élevé, moins l'essai est précis. Le manque de précision peut être attribué par exemple aux erreurs de mesures ou au dispositif. Il est à comparer avec les ETR généralement observés pour la même variable dans des essais analogues. Généralement, on admet qu'un ETR inférieur à 15 % à la moyenne des données brutes permet d'avancer que l'essai est précis.

L'analyse de variance (ou test de F-Student) détermine la significativité des effets pour les facteurs et les blocs. Les effets sont considérés comme significatifs lorsque la probabilité « p-value » de déclarer à tort des différences entre les traitements ou entre les blocs est inférieure à 5% (risque α). Lorsque la p-value des traitements est inférieure à 5%, l'effet des traitements est significatif. Lorsque la p-value des blocs est inférieure à 5%, cela signifie que les blocs ont été bien disposés, c'est-à-dire perpendiculairement au gradient d'hétérogénéité, par exemple. Dans le cas contraire, cela signifie que soit le terrain est homogène, soit les blocs sont mal disposés. Cela n'invalide cependant pas l'essai.

La puissance est ensuite testée *a priori* et *a posteriori*. La puissance d'un essai agronomique correspond à la probabilité de mettre en évidence une différence entre les traitements. Elle permet de confirmer qu'il y a des différences. En générale, on cherche à ce que l'essai présente une puissance minimale de 60% et idéalement comprise entre 80 et 90%

Une fois assuré qu'il existe bien une différence significative entre les traitements, on cherche à caractériser ces différences entre elles. On effectue pour cela un test de comparaison de moyennes (Test de Newman-Keuls) : les traitements sont regroupés en groupes homogènes au seuil de 5 %.

Il est possible que les données ne répondent pas aux conditions de l'ANOVA, telles les interactions « bloc x traitement » ou de non égalité des variances des blocs et/ou des traitements entre elles (voir paragraphe précédent). On effectue alors un test non paramétrique permettant de comparer des échantillons indépendants grâce au test de Kruskal-Wallis. Ce test, n'imposant pas de conditions de distribution sur les données permet de mettre en évidence s'il existe une différence significative entre les traitements. Il est cependant moins puissant que l'ANOVA.

Comme évoqué plus haut, il est primordial d'essayer de relier les résultats invalidés au plan statistique aux réalités du terrain. C'est pourquoi une critique des sorties Statbox est nécessaire pour ne pas exclure ou transformer des données qui pourraient se révéler agronomiquement correctes.

3. Résultats

3.1. Validation statistique des essais et des jeux de données et problèmes rencontrés

Les vérifications préliminaires sur les données d'Ambarès et de La Bouzule ont été effectuées pour chaque paramètre suivi à chaque date de prélèvement pour chacun des compartiments.

Certains jeux de données ont présenté des obstacles à la réalisation du test de l'ANOVA : défaut de normalité des résidus, présence de résidus suspects, présence de gradients, etc. Nous développerons ici les méthodes statistiques utilisées pour pallier à ces problèmes.

Les défauts de normalité ont été corrigés par transformation des données en logarithme (log) et ont le plus souvent permis de remplir les conditions de l'ANOVA. Dans le cas où la transformation n'a pas donné les résultats escomptés, un test non paramétrique (test de Kruskal Wallis) a été effectué. Ce test a permis de mettre en évidence ou non des différences significatives entre les traitements.

Le logiciel Statbox a parfois détecté des résidus suspects grâce au test de Grubbs. Dans la plupart des cas, il a été possible de supprimer la donnée jugée aberrante du point de vue statistique et agronomique. La valeur aberrante est éliminée, puis le logiciel Statbox la corrige par une estimation de Yates. Pour chaque triplet paramètre/date/parcelle élémentaire concerné par ces corrections, l'information a été référencée dans le fichier de saisie en tant que « valeurs aberrantes corrigées », comme présenté dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Exemple de mise en évidence des résidus suspects dans le fichier de saisie Excel pour le dispositif de La Bouzule dans le compartiment sol

Appréciation générale des données PRO	Dates, paramètres pour lesquels les données PRO sont jugées non valides	Raisons de la non validité ou de la réserve sur les données en question
Valides avec réserves	09/09/1999 (0-25 cm), Corg, parcelle 206.	Résidu suspect : valeur estimée de Yates = 20,4222222222
Valides avec réserves	05/08/1998 (0-25cm), N total, parcelle 403	Résidu suspect : valeur estimée de Yates = 1,92925925925926
Valides avec réserves	08/09/1998 (0-25cm), P2O5, parcelle 101	Résidu suspect : valeur estimée de Yates = 0,259037037037037

L'analyse du carbone organique du sol et de l'azote total du dispositif de La Bouzule ont mis en avant un gradient à l'intérieur du dispositif. Pour le prélèvement de novembre 2002 (Figure 4.2), on peut remarquer une concentration de taches blanches dans la partie haute du tableau, traduisant la présence de petits résidus (< -0.036) dans cette partie du dispositif. Au contraire, les résidus plus importants (< 0.036 et < 999 999) semblent concentrés vers la base du plan.

La cartographie des résidus pour le carbone organique d'août 2001 (figure 4.1) semble montrer une disposition qui suit une trajectoire partant du haut du premier bloc vers le bas du quatrième bloc, ici représenté par une flèche. Ces deux répartitions traduisent un gradient qui se retrouve à d'autres dates de manière plus ou moins prononcée.

La présence de ce gradient signifie que les résultats des parcelles disposées dans la partie en amont du gradient devraient présenter des résultats inférieurs aux parcelles situées en aval, du moins pour le carbone organique et l'azote total du sol. La disposition des parcelles témoins en fertilisation minérale optimale dans le dispositif (Figure 2) montre qu'elles sont concentrées en amont du gradient. Cela pourrait introduire un biais expérimental dans les résultats pour ces paramètres en les surestimant, il s'agira donc d'interpréter les résultats de ces paramètres avec réserve.

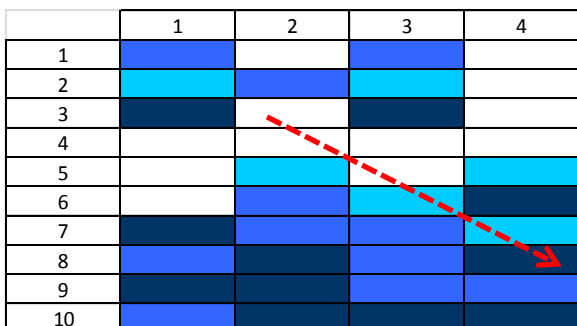


Figure 4.1 : Cartographie des résidus des données pour le C organique du sol le 24/08/2001

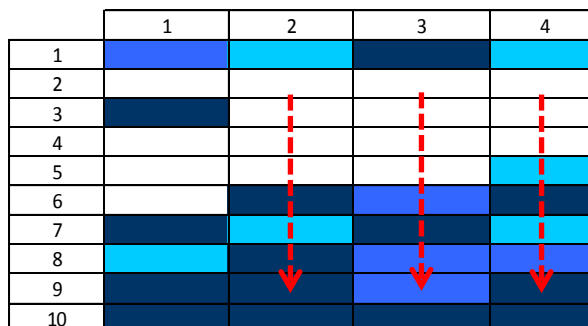
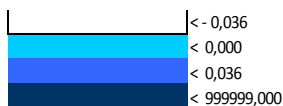


Figure 4.2 : Cartographie des résidus des données pour le N total du sol le 21/11/2002

3.2. Mise en évidence de différences entre traitements

Les parcelles élémentaires du dispositif d'Ambarès sur le site de Couhins recevaient, comme cela a été vu, des boues de station d'épuration à deux niveaux de raisonnement, à 10t/ha/an et à 100t/ha/2 ans. Pour les analyses statistiques, il a été choisi de ne pas considérer le traitement ayant reçu 100 t de boue à l'hectare. En effet, la dose d'apport de la boue étant très importante par rapport aux pratiques agricoles, les résultats pour ce traitement étaient très différents de ceux des autres traitements. De ce fait, les possibles différences existant entre les 3 autres traitements étaient masquées.

3.2.1. Teneurs en C_{org} , N et P dans le sol

Les résultats concernant les données C_{org} et N sont issus des données de La Bouzule car les analyses n'ont pas été effectuées sur Ambarès pour ces paramètres, tandis que les données P concernent les deux sites.

3.2.1.1. Teneurs en C_{org} du sol

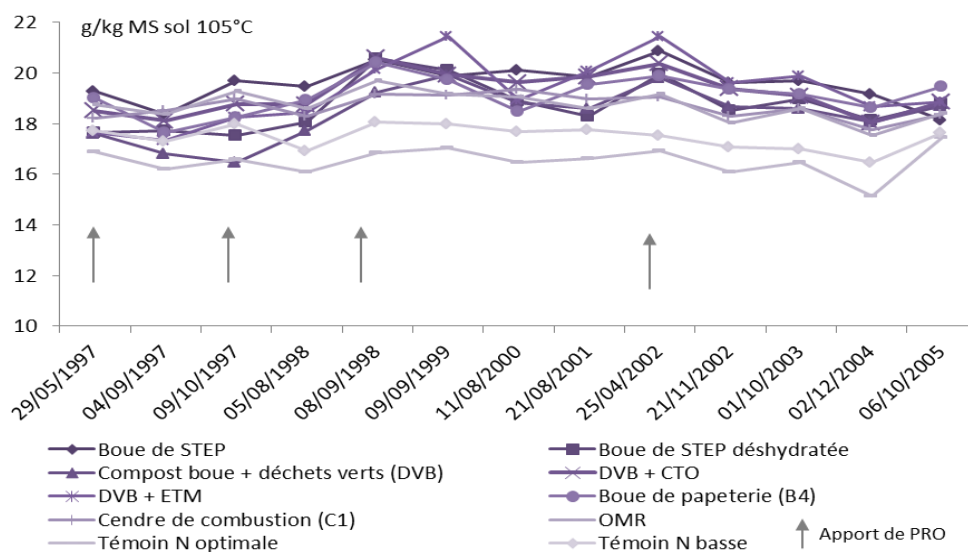


Figure 5 : Teneurs moyennes par traitement en carbone organique (C_{org} (Dumas) du sol de La Bouzule dans l'horizon superficiel (0-20 cm), exprimées en $g.kg^{-1}$ matière sèche (MS) de sol à 105°C (CTO = composé trace organique, ETM = élément trace métallique, OMR = compost d'ordures ménagères)

Pour **La Bouzule**, les concentrations en carbone organique (C_{org} , méthode d'analyse Dumas) dans le sol pour les parcelles ayant reçu des traitements organiques semblent augmenter à partir du deuxième épandage, le 09/10/1997, et commencent à diminuer à partir du 08/09/1998 (Figure 5). Comme attendu, les traitements témoins en fertilisation minérale présentent des teneurs en C_{org} significativement inférieures aux traitements recevant des PRO de septembre 1999 à octobre 2003. A partir de 2002, les teneurs en C_{org} ont tendance à diminuer pour l'ensemble des traitements. A la fin de l'essai, en 2005, les teneurs pour les sols témoins augmentent et les différences avec les autres traitements ne sont plus significatives. Globalement, le témoin en fertilisation haute présente les concentrations les plus faibles en C organique tout au long de l'essai.

3.2.1.2. Teneurs en azote total (N_{tot}) du sol

Pour **La Bouzule**, des différences significatives entre les traitements de teneurs en azote total du sol (N_{tot}) ont été mises en évidence, sans pour autant qu'il soit possible de former des groupes homogènes de traitements distincts (test de Newman-Keuls, $\alpha = 5\%$)(Figure 6). En effet, les valeurs sont proches d'un traitement à l'autre et donc les groupes se recoupent.

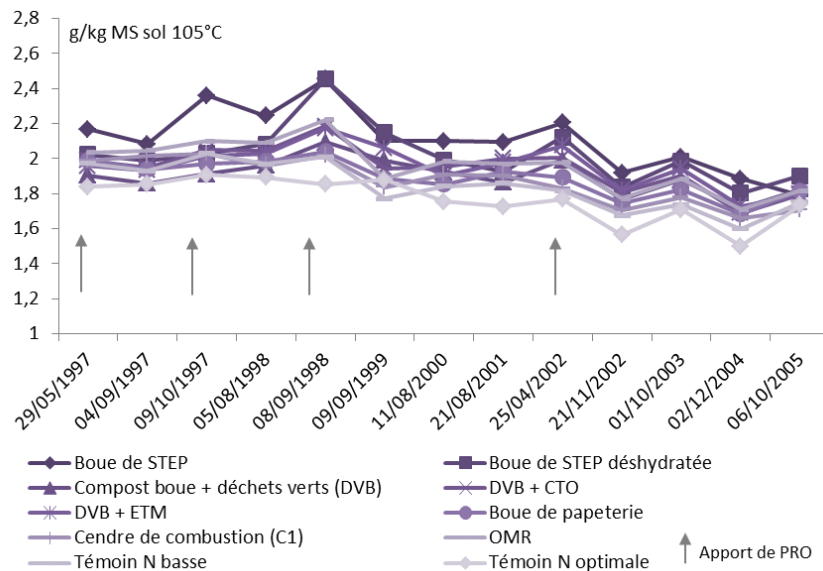


Figure 6 : Teneurs en Azote total du sol de La Bouzule en horizon superficiel (0-20 cm), exprimées en $g.kg^{-1}$ MS de sol à $105^{\circ}C$

Lors du deuxième épandage et en septembre 1998, la boue partiellement déshydratée puis les boues partiellement déshydratées et déshydratées ont des teneurs significativement plus élevées que les autres traitements. Le traitement témoin Th (fertilisation minérale haute) présente des teneurs en N_{total} significativement inférieures aux autres traitements en 2001. A partir de septembre 1998, les teneurs en N_{tot} de l'ensemble des traitements ont tendance à diminuer. On constate néanmoins une hausse de l'ordre de $0,2 g.kg^{-1}$ MS $105^{\circ}C$ pour le témoin Th lors du dernier épandage.

3.2.1.3. Teneurs en P du sol

Les jeux de données concernant le P_2O_5 de **La Bouzule** ont été validés statistiquement pour toutes les années jusqu'au 11/08/2000. Les premières différences significatives entre les traitements apparaissent au bout du deuxième épandage, en octobre 1997 (Figure 7). Le traitement recevant la boue de station d'épuration partiellement déshydratée (Boue de STEP B1) présente des teneurs en P_2O_5 dans le sol significativement plus élevées que pour les autres traitements. Au troisième épandage, les traitements B1 et B2 présentent des teneurs significativement supérieures aux autres traitements.

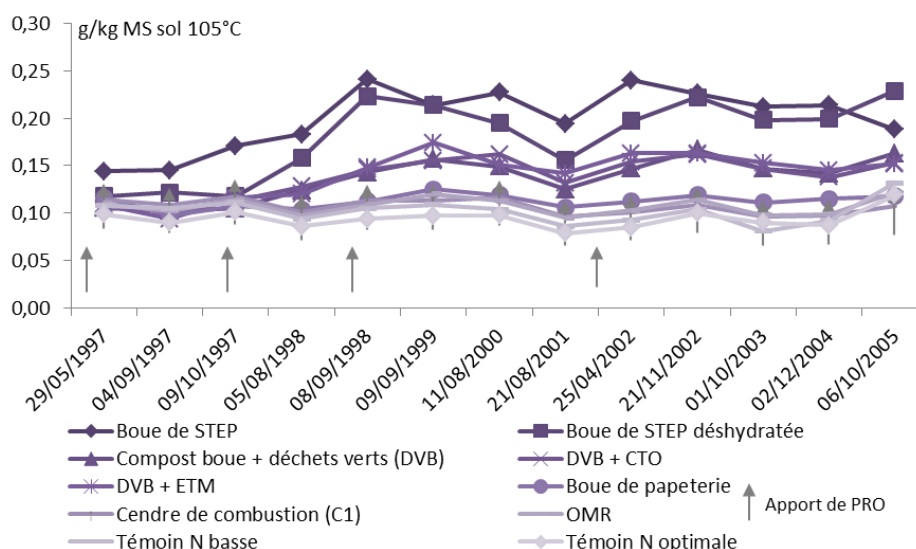


Figure 7 : Teneurs en P_2O_5 (Olsen) du sol de La Bouzule en horizon superficiel (0-20 cm), exprimées en $g \cdot kg^{-1}$ MS de sol à $105^\circ C$

Les différences s'accroissent à partir de 1998 pour mettre en évidence trois groupes homogènes significativement différents selon le test de Newman-Keuls ($\alpha = 5\%$) : Groupe (a) : Boue de station d'épuration partiellement déshydratée B1, boue de station d'épuration déshydratée B2, Groupe (b) : Compost de boues avec des déchets verts (DVB), DVB + ETM, DVB + CTO, Groupe (c) : Boue de papeterie, cendres de combustion, compost d'ordures ménagères, témoins à fertilisation minérale basse et optimale. Les sols ayant reçu des traitements du groupe (a) présentent des teneurs en P_2O_5 Olsen significativement supérieures aux sols ayant reçu les traitements du groupe (b), eux-mêmes présentant des teneurs significativement supérieures aux sols ayant reçu les traitements du groupe (c).

Pour **Ambarès**, on remarque une augmentation faible des teneurs en P total dans le sol, puis une augmentation plus importante à partir de 1981 (Figure 8). Elle concerne principalement le traitement B10 qui se distingue des deux autres traitements en 1986 uniquement en présentant des teneurs significativement supérieures.

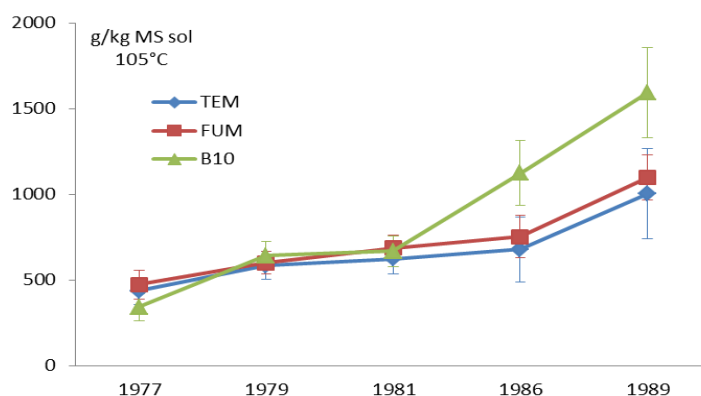


Figure 8 : Teneurs moyennes en P total dans le sol du dispositif d'Ambarès en horizon superficiel (0-20 cm), exprimées en $g \cdot kg^{-1}$ MS de sol à $105^\circ C$

3.2.2. Eléments traces métalliques (ETM) dans le sol

Pour le site de **la Bouzule**, peu de différences sont significatives entre les traitements pour les teneurs en ETM de l'horizon superficiel (0-20 cm), quels que soient les ETM considérés (Annexe I). Pour le nickel (Ni) (Annexe I.1), le plomb (Pb) (Annexe I.2) et le zinc (Zn) (Annexe I.4), aucun traitement ne se distingue

significativement des autres au cours du temps. Les parcelles témoins semblent présenter les concentrations en cuivre (Cu) les plus faibles et les parcelles traitées aux boues les plus élevées (Annexe I.3).

Concernant **Ambarès** pour le manganèse (Mn) (Figure 9), Zn (Annexe II.1), Pb (Annexe II.3), le cadmium (Cd) (Annexe II.4) et Cu (Figure 10), on observe une augmentation lente des teneurs en ETM de l'horizon superficiel du sol jusqu'en 1981, puis une augmentation plus importante pour tous les traitements.

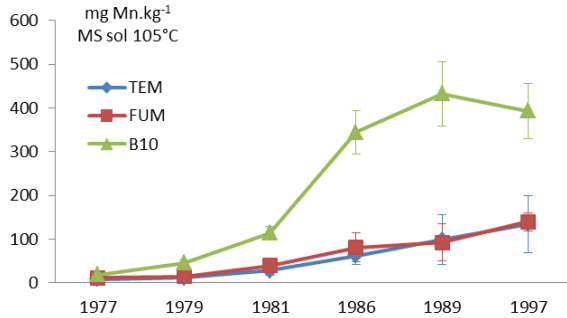


Figure 9 : Teneurs moyennes en Mn dans le sol d'Ambarès, exprimées en mg.kg^{-1} MS de sol 105°C

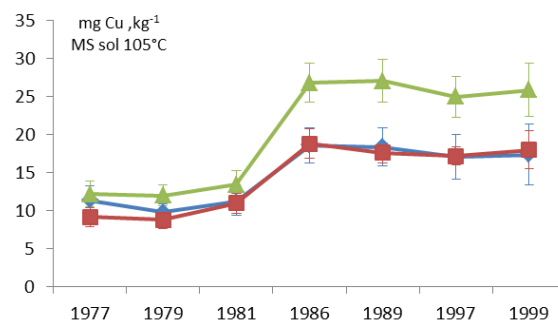


Figure 10 : Teneurs moyennes en Cu dans le sol d'Ambarès, exprimées en mg.kg^{-1} MS de sol 105°C

Pour le fer (Fe) (Annexe II.2), l'évolution des teneurs suit la même tendance mais l'augmentation ne débute qu'à partir en 1981. Pour Ni (Annexe II.5) et le chrome (Cr) (Annexe II.6), on observe une diminution des concentrations en 1986 pour le traitement fumier et le traitement témoin, puis une légère augmentation des teneurs.

D'autre part, on notera que l'augmentation des teneurs de l'ensemble des ETM mesurés pour le traitement B10 est plus importante que pour les autres traitements, avec des concentrations en ETM multipliées par un facteur de 3 à 4 par rapport aux autres traitements.

A partir de 1997, les concentrations en ETM ont tendance à diminuer ou à se stabiliser. Les tests statistiques ont confirmé les différences observées pour tous les ETM suivis, hormis pour le chrome et le nickel pour lesquels les différences ne sont significatives que deux années, en 1986 et 1997. Les groupes homogènes suivant ont été mis en évidence : (a) Le traitement B10 et (b) les traitements FUM et TEM. On peut donc en déduire que les apports de la boue B10 ont entraînés des teneurs en ETM dans le sol significativement supérieures au groupe (b), c'est-à-dire pour les traitements recevant du fumier ou le témoin (test de Newman-Keuls, $\alpha = 5\%$).

3.2.3. Données plantes : rendements, teneurs N, P, ETM

Pour les deux dispositifs, les effets des traitements sur le rendement des cultures et sur les teneurs en N, P et ETM des cultures d'Ambarès et de La Bouzule ont été comparés. Les résultats sont présentés ci-dessous.

3.2.3.1. La Bouzule : rendements

Les rendements relatifs en grains des cultures ont été calculés pour le blé tendre d'hiver, le colza d'hiver et le maïs, pour chaque traitement. Le rendement relatif en grains d'un traitement donné est calculé comme étant le rapport entre le rendement moyen obtenu pour le traitement et le rendement moyen obtenu pour le traitement témoin en fertilisation minérale optimale (Figure 11). Au niveau statistique, aucune différence significative entre les traitements n'a été mise évidence pour les huit années de mesure des rendements pour le site de La Bouzule. D'après la Figure 11, les rendements semblent stables les trois premières années, et seules les parcelles traitées avec les boues de station d'épuration partiellement déshydratées (B1) et déshydratées (B2) présentent des rendements supérieurs aux parcelles en fertilisation minérale optimale (Th), mais de manière non significative. Une baisse des

rendements est observée pour toutes les parcelles ayant reçu un traitement organique en 2001 et en 2003. Les deux dernières années de mesures, les parcelles ayant reçu des PRO retrouvent des rendements équivalents aux parcelles en fertilisation optimale.

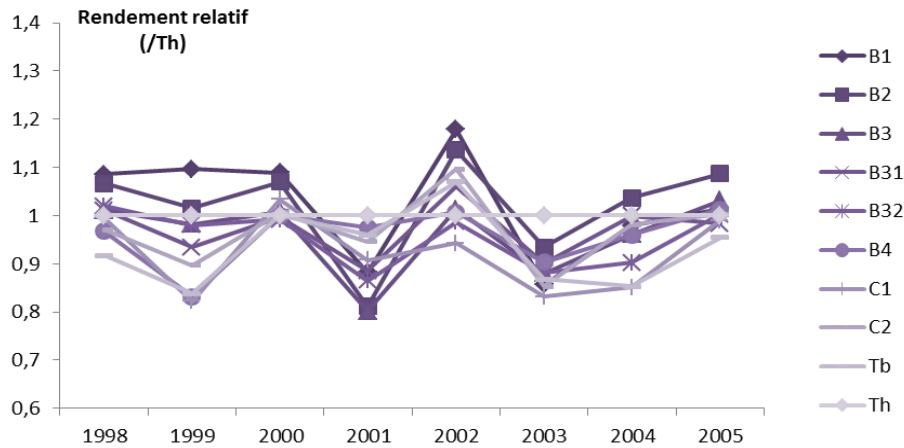


Figure 11 : Rendements relatifs en grains des cultures par traitement sur le dispositif de La Bouzule (1998, 2000, 2001 : blé tendre d’hiver ; 1999 : colza d’hiver ; 2002- 2005 : maïs).

3.2.3.2. Ambarès : Rendements, teneurs N, P, ETM des plantes cultivées

Pour Ambarès, seule l’année 1977 a montré une différence significative entre les traitements au niveau statistique en ce qui concerne les rendements. Cette année, les parcelles témoin et les parcelles ayant reçu le traitement B10 ont des rendements en grains significativement supérieurs aux parcelles ayant reçu le traitement fumier. Les autres années, les différences entre traitements ne sont pas significatives (Figure 12). Les rendements semblent augmenter les deux premières années, diminuer jusqu’en 1991, puis augmenter légèrement les dernières années des mesures pour tous les traitements. Les rendements des parcelles ayant reçu du fumier semblent globalement inférieurs aux rendements des autres parcelles, mais sans différence significative.

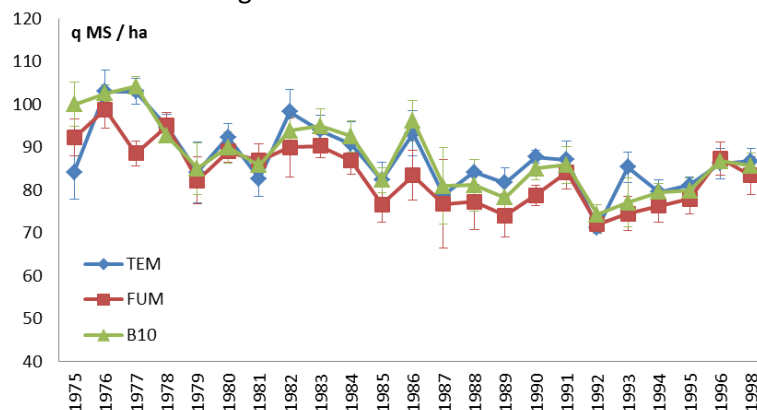


Figure 12 : Rendements moyens par traitement des cultures de maïs du dispositif d'Ambarès (site de Couhins), exprimés en quintaux de masse sèche (MS) de grain / ha. TEM = témoin ; FUM = Fumier ; B10 = boue de station d'épuration épanchée à mesure de 10t MS/ha.

L’analyse des éléments majeurs (azote et phosphore total) dans les végétaux a été réalisée sur la 6^e feuille et les grains de maïs. Pour les grains, les différences entre les traitements ne sont pas significatives pour l’azote la plupart des années, sauf en 1977. Cette année, le traitement fumier se

distingue avec des teneurs moyennes de $15,32 \text{ g.kg}^{-1}$ MS significativement inférieures aux traitements témoin et B10, avec des teneurs moyennes respectives de $17,1$ et $17,6 \text{ g.kg}^{-1}$ MS (Figure 15). Les teneurs en N et P des grains sont stables au cours du temps (Figures 15 et 16).

Dans la 6^e feuille, lorsque les concentrations en N dans les parcelles ayant reçu du fumier sont inférieures à celles retrouvées dans les autres parcelles, cette différence est significative. Les concentrations en N sont très variables au cours du temps (Figure 17). Quels que soient les traitements, on remarque une hausse des teneurs en N de 1979 à 1983, une chute importante en 1987, et enfin un retour à des taux plus élevés en 1988.

Dans les grains de maïs, les parcelles ayant reçu le traitement B10 présentent des teneurs en phosphore total (P_{total}) significativement inférieures aux autres parcelles (Figure 15). Les concentrations en P_{total} présentent trois phases (Figure 18) : dans la première phase, elles sont constantes, et les traitements TEM et FUM constituent un groupe homogène (test de Newman-Keuls, $\alpha = 5\%$) avec des teneurs significativement supérieures au traitement B10. Une deuxième phase distingue les trois traitements même si les différences sont moins significatives. Dans la dernière phase, à partir de 1994, les différences ne sont plus significatives et on observe une diminution des concentrations en P.

Concernant les ETM dans les grains de maïs, on observe une augmentation des teneurs en Cu (Annexe IV.1), puisque les concentrations doublent entre le début et la fin de l'essai pour tous les traitements, en passant de 1 mg.kg^{-1} MS en moyenne pour tous les traitements en 1976 à $1,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ MS en 1996. Pour Fe (Annexe IV.2), les teneurs initialement de 19 mg.kg^{-1} MS diminuent de 5 mg.kg^{-1} entre 1975 et 1984, augmentent rapidement en 1985 jusqu'à $28,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ MS, puis diminuent à nouveau jusqu'en 1996 pour retourner aux teneurs initiales. Dans ces deux cas, aucun traitement ne se distingue des autres. Les teneurs en Mn ont tendance à diminuer dans les grains, avec des teneurs initiales autour de $7,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ MS et finales autour de 5 mg.kg^{-1} MS, malgré une hausse en 1987 jusqu'à 13 mg.kg^{-1} MS (Figure 13). Ce pic en regard des autres résultats ne semble pas trouver de justification est peut-être dû à une erreur de mesure. Le traitement témoin présente des teneurs en Mn significativement supérieures aux autres traitements à partir de 1978, sauf en 1982. Les teneurs en Zn augmentent de 5 mg.kg^{-1} MS entre 1975 et 1996, passant de 21 mg.kg^{-1} MS à 28 mg.kg^{-1} MS, et varient peu le reste de l'essai (Figure 14). Le traitement B10 présente des concentrations significativement supérieures de 2 mg.kg^{-1} MS en moyenne par rapport aux autres traitements à partir de 1978 jusqu'en 1985, mais par la suite les différences ne sont plus significatives. Pour le cadmium (Cd) (Annexe IV.3) et le chrome (Cr) (Annexe IV.4), les données ne sont disponibles qu'à partir de 1985 car les années précédentes, les méthodes d'analyses ne permettaient pas de mesurer des teneurs inférieures à $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ MS. En effet, de 1974 à 1984, une calcination avec reprise HCl était employée, et de 1985 à 1992, la reprise HNO₃ a remplacé la reprise HCl. Cela a certainement permis de rendre détectables de faibles teneurs en Cr et Cd. Les teneurs semblent en diminution pour les deux ETM, malgré une importante variabilité certaines années. Les essais ont été jugés peu précis pour Cd et Cr, l'interprétation des résultats doit donc être réalisée avec réserve.

Pour tous les ETM analysés dans les grains de maïs, une augmentation des teneurs plus ou moins prononcée apparaît en 1985, et les Cd et Cr deviennent détectables grâce au changement des méthodes d'analyse.

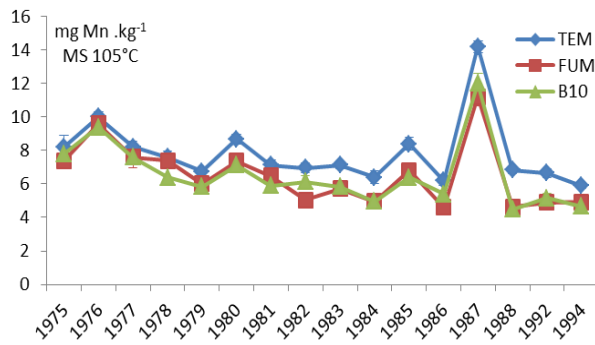


Figure 14 : Teneurs moyennes en Mn dans les grains de maïs d'Ambarès, exprimées en mg.kg^{-1} MS grain

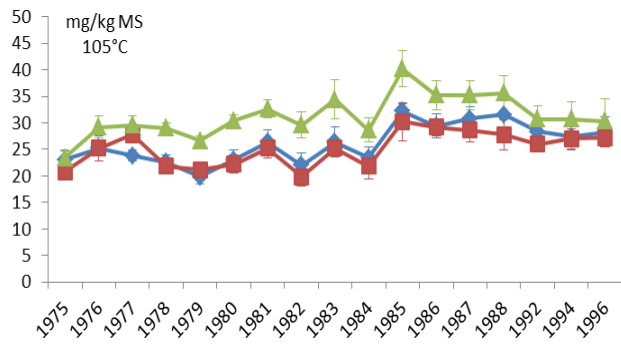


Figure 13 : Teneurs moyennes en Zn dans les grains de maïs d'Ambarès, exprimées en mg.kg^{-1} MS grain

Dans la 6^e feuille de maïs au stade 10-12 feuilles, les résultats pour Cu montrent peu de variations au cours du temps (Annexe III.1). Le traitement fumier présente des teneurs inférieures aux autres traitements entre 1985 et 1998, sauf en 1986, 1989, 1992 et 1996. Les teneurs en Fe (Annexe III.2) sont très variables, et alternent des phases d'augmentation et de diminution chaque année de manière identique pour tous les traitements. On observe des différences significatives entre les traitements pour les teneurs en Mn de la 6^e feuille (Annexe III.3). Les quatre premières années, les teneurs en Mn diminuent de 80 mg.kg^{-1} MS en moyenne pour tous les traitements, puisqu'elles passent de 160 mg.kg^{-1} . Les plantes des parcelles témoins présentaient initialement des teneurs en Mn supérieures aux plantes des autres parcelles en début d'essai. Cette différence est significative jusqu'en 1996. Les traitements fumier et B10 se distinguent de manière significative à partir de 1976. On observe une augmentation des teneurs à partir de cette date, puis une diminution à partir de 1992. En 1996, les traitements ne présentent plus de différences entre eux. Le traitement B10 présente des teneurs en Zn significativement supérieures aux autres traitements durant tout l'essai (Annexe III.4). Elles augmentent entre 1975 et 1987, puis semblent diminuer ensuite pour atteindre le niveau des autres traitements. Pour le Pb (Annexe III.5), les teneurs semblent peu stables les dix premières années mais ne varient pas en fonction du traitement, puis elles se stabilisent autour de 1 mg.kg^{-1} MS. L'essai est jugé peu précis à partir de 1986.

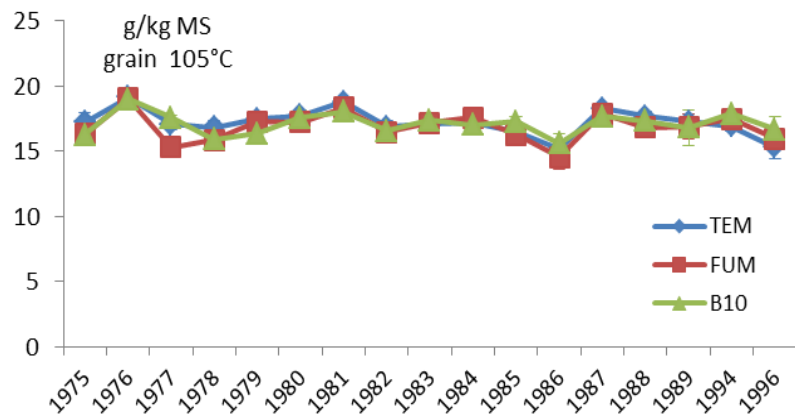


Figure 15 : Teneurs en azote des grains de maïs du dispositif d'Ambarès, exprimées en g.kg^{-1} MS de grain à 105°C

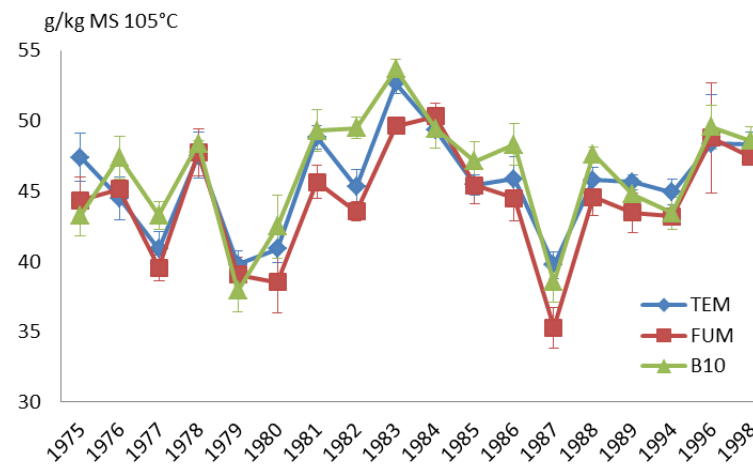


Figure 17 : Teneurs en azote de la 6^e feuille de maïs du dispositif d'Ambarès au stade 10-12 feuilles, exprimées en g.kg^{-1} MS de feuille à 105°C

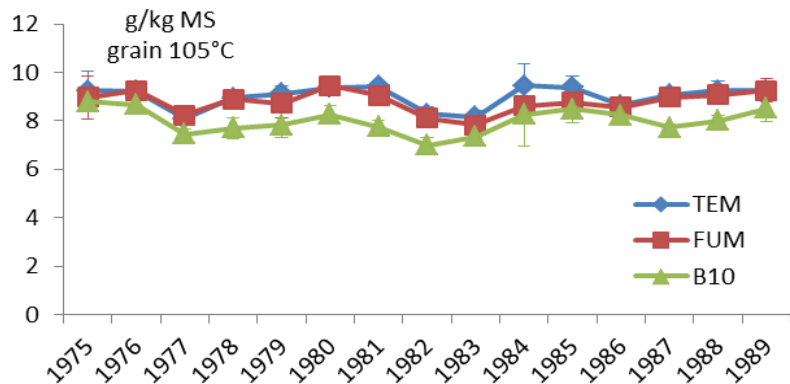


Figure 16 : Teneurs en Phosphore total des grains de maïs du dispositif d'Ambarès, exprimées en g.kg^{-1} MS de grain à 105°C

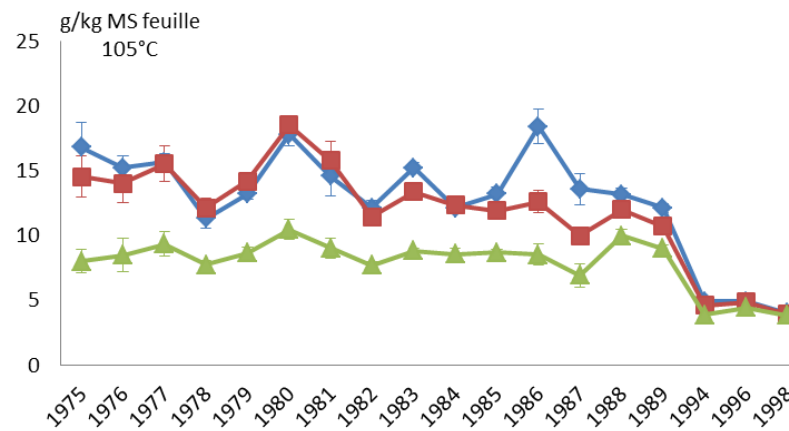


Figure 18 : Teneurs en phosphore total de la 6^e feuille de maïs du dispositif d'Ambarès au stade 10-12 feuilles, exprimées en g.kg^{-1} MS de feuille à 105°C

4. Discussion

4.1. Pertinence des choix expérimentaux

Les gradients pour le N et le C observés dans le dispositif de **La Bouzule** semblaient suggérer la présence d'une pente (Figures 4.1 et 4.2). Cela a été confirmé par des analyses des teneurs en argiles de surface en 2010 et 2011, communiquées par la responsable du site, révélant la présence d'une pente inférieure à 2 %. Ces analyses ont montré une répartition inégale des teneurs en argiles au sein du dispositif la première année, avec une accumulation des teneurs en argile dans la partie basse des blocs, phénomène accentué l'année suivante. La pente part du haut jusqu'au bas du dispositif, en biais, à partir du bloc 2 jusqu'au bloc 4. Les argiles auraient ainsi pu glisser le long de la pente, entraînant de la matière organique, ainsi que du carbone et de l'azote, éléments constitutifs de la matière organique (Genot et al., 2007). Le ruissellement causé par les eaux de pluie a pu entraîner l'azote de surface vers les parcelles situées en aval de la pente. Les blocs ont été disposés parallèlement à la pente, or une disposition perpendiculaire des blocs par rapport à la pente aurait permis d'en limiter les effets, en permettant la création de parcelles homogènes au sein d'un même bloc. Les teneurs en azote et carbone pour les sols des parcelles témoins à fertilisation azotée optimale sont donc à prendre avec recul, et, la différence observée certaines années pour le carbone organique est à interpréter avec réserve.

Cela soulève également la question de la randomisation qui semble présenter un défaut de répartition aléatoire des parcelles du traitement en fertilisation minérale optimale (Th).

Dans le cas d'**Ambarès**, une pente était également présente, et de la même manière, les blocs ont été disposés parallèlement à cette pente. Ces deux exemples démontrent l'importance de la réflexion sur la mise en place d'un essai et de l'étude du terrain au préalable, afin d'identifier les hétérogénéités pouvant influencer les résultats futurs.

Comme précisé plus tôt, il a été choisi de ne pas prendre en compte les données obtenues pour le traitement B100 (boues apportées à une dose de 100 t / ha) sur le dispositif d'Ambarès dans les résultats. Le but du traitement était d'accentuer les effets d'apports de contaminants métalliques des boues et d'accélérer les processus observés. Cependant, en intégrant ce traitement dans les analyses statistiques, une éventuelle différence significative entre les trois autres traitements ne pouvait être observée du fait des valeurs largement supérieures pour le traitement B100 par rapport aux valeurs observées dans les autres traitements. D'autre part, les données n'étaient que peu exploitables au niveau statistique, car les conditions de l'ANOVA n'étaient que rarement remplies, et les essais étaient jugés imprécis (écart-type résiduel élevé). Au niveau agronomique, l'épandage de boue de station d'épuration à mesure de 100 t MS/ha /2 ans est très éloigné des pratiques courantes en agriculture, puisqu'on estime que 2,5 t MS/ha/an sont épandues en moyenne en France (MEEDDAT/DEB, 2007). L'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pose la limite à 30 t MS/ha sur 10 ans. La pertinence d'un tel traitement pourrait donc être remise en cause, même si l'essai a commencé avant que la législation soit appliquée. Enfin, ce fort dosage a potentiellement entraîné une contamination des parcelles voisines, notamment des témoins, mais cela sera précisé ultérieurement.

4.2. Valeur fertilisante et amendante des PRO

- Fertilisation phosphatée

L'extraction du phosphore peut être réalisée grâce à trois méthodes d'après Schwartz et al. (2005) : Olsen, Dyer-Delemon et Joret-Hebert. Dans le cas de **La Bouzule**, la méthode Olsen a été choisie afin d'extraire le P_2O_5 disponible, et car elle est adaptée aux sols calcaires et neutres. Le P retrouvé dans les eaux usées en France provient essentiellement du métabolisme humain (Dernat

et al., 1994), des lessives, des rejets industriels et de l'agriculture par ruissellement. La déphosphatation de l'eau en station d'épuration (STEP) urbaine peut se faire par traitement biologique grâce à l'utilisation de bactéries et protozoaires aérobies qui assimilent le P, ou via suraccumulation des phosphates, par des procédés aérobies puis anaérobies successifs (Deronzier & Choubert, 2004). Dans ce deuxième cas, la teneur en P organique peut être importante, de l'ordre de 80 à 100 g.kg⁻¹ MS (Comeau, 1986). Les boues biologiques de STEP testées dans La Bouzule, constitueraient donc une source importante de P organique. La fraction de P₂O₅ biodisponible dans ces boues serait également importante (Tableau 5), de l'ordre de 50 à 90 g.kg⁻¹ MS de boue. Cela pourrait expliquer les teneurs en P₂O₅ Olsen significativement plus importantes dans les sols traités aux boues de STEP par rapport aux teneurs observées dans les sols du traitement recevant du fumier ou du traitement témoin sans apport organique.

Tableau 5 : Récapitulatif des teneurs en P, N, C des PRO avant chaque épandage, exprimées en g.kg⁻¹ MS de PRO 105°C : P₂O₅ (Olsen), C_{org} (Dumas), N_{tot} (Kjeldhal)

	29/05/1997			09/10/1997			08/09/1998			25/04/2002		
	P ₂ O ₅	N	C	P ₂ O ₅	N	C	P ₂ O ₅	N	C	P ₂ O ₅	N	C
Boue de STEP	NC	NC	NC	NC	NC	NC	92,4	58	296	52,1	61	336
Boue de STEP déshydratée	58,2	35	272	55,3	39	288	96,8	40	278	59	40	262
DVB	20,5	17	NC	30,9	18	319	50,4	24	337	35	19	288
DVB + CTO	2,2	6	242	33,9	20	331	29,9	18	401	41	22	252
DVB + ETM	12,1	13	434	38,3	20	301	49,8	22	319	40,6	22	256
Boue de papeterie	11	13	425	2,7	6	229	3,7	7	238	2,6	7	202
Cendre de combustion	1,1	0,5	50	1	0,4	55	3,2	1	75	5,2	0,5	45
OMR	5,1	11	210	5,7	10	219	7,8	18	269	6,4	12	198

La boue de station déshydratée, malgré les teneurs initiales en P₂O₅ Olsen identiques aux boues partiellement déshydratées en 2002, semblent présenter moins de P biodisponible pour les végétaux dans le sol, car ce traitement présentait des teneurs en P₂O₅ Olsen dans le sol inférieures au traitement avec la boue partiellement déshydratée. Cette différence pourrait être due à la méthode d'analyse qui sous-estime le P bio-disponible pour les sols ayant reçu ces boues déshydratées. Ce phénomène pourrait aussi être causé par les procédés de déshydratation. En effet, il est démontré que les procédés industriels de traitement des boues (chaulage, chauffage) tendent à faire diminuer la fraction de P bio-disponible (Fardeau, 2000). Dans le cas de La Bouzule, les procédés de déshydratation ne sont pas connus et ne permettent donc pas de conclure à ce sujet. Le compostage semble également faire diminuer les quantités de P total et de P disponible, comme c'est le cas pour les composts de boue avec des déchets verts (DVB). Les teneurs initiales dans les PRO sont deux fois moins importantes que dans les boues déshydratées, et trois fois moins que dans les boues partiellement déshydratées (Tableau 5). Le dopage en polluants ne semble pas impacter sur la disponibilité du P dans les composts DVB, car ils ont subi des mêmes procédés de compostage. Les traitements organiques qui n'ont pas présenté de différence significative avec les témoins dans les sols présentaient des teneurs initiales en P dans les PRO faibles, de l'ordre de 1 à 11 g.kg⁻¹ pour les boues de papeterie, cendres de combustion et OMR, ce qui peut expliquer le peu de phosphore retrouvé dans les sols traités avec ces produits.

Ces résultats semblent coïncider avec ceux obtenus sur le site d'Ambarès, où le traitement à base de boue, qui était déshydratée sur filtre à bande, permettait d'augmenter le P dans les sols mais de manière moins importante que pour La Bouzule. Les teneurs initiales dans la boue étaient supérieures aux teneurs dans le fumier (Tableau 6), de l'ordre de 44 g.kg⁻¹ MS dans la boue en moyenne contre 12 g.kg⁻¹ MS dans le fumier. Dans ce cas, seul le P_{total} a été analysé, non pas la

fraction biodisponible. Les teneurs en P retrouvées dans les végétaux au niveau de la 6^e feuille peuvent informer sur sa disponibilité, puisqu'il a pu être utilisé par la plante pour sa croissance. Les résultats semblent montrer que le P est moins disponible pour le traitement B10 que pour les autres traitements (Figure 18), ce qui contredit les conclusions pour La Bouzule.

Tableau 6 : Récapitulatif des teneurs en P des PRO avant épandage, exprimées en g.kg⁻¹ MS de PRO 105°C

	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Fumier	/	/	/	/	12,6	11,5	13,7	12,8	15,9	10,4
Boue	50,3	30,6	51,9	53,3	42	48,7	52,8	31,6	24	22,5
	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Fumier	16,5	13	12,6	10,8	16,1	17,9	8,5	8	9,6	6,6
Boue	29,5	25	47,5	58	52,3	59,6	53,3	62,3	26	56

Les concentrations en P retrouvées dans le sol semblent donc étroitement liées aux compositions initiales des traitements, et la fraction disponible semble varier en fonctions des procédés de traitement (compostage, déshydratation) des PRO, et potentiellement avec les méthodes de mesure utilisées.

- Fertilisation azotée

Comme attendu, les concentrations en azote total du sol pour **La Bouzule** augmentent après épandage de produit organique, mais diminuent rapidement par la suite. Il est cependant difficile d'émettre des conclusions pour ce second point. Les analyses des horizons plus profonds pour deux années (1999 et 2002) n'ont pas mis en évidence des teneurs importantes dans ces couches de sols, ce qui aurait permis de supposer un phénomène d'infiltration de l'azote. Ces mesures n'ont cependant pas été assez répétées pour émettre des hypothèses pertinentes à ce sujet. Les mesures effectuées permettent d'avoir des informations sur les teneurs en azote total et non pas sur les proportions en N minéral et organique dans les PRO et les sols, et donc la fraction disponible pour les plantes. D'autre part, la quantité d'azote absorbée par les végétaux n'est pas non plus connue car l'essai avait pour objet les phénomènes écotoxicologiques. Le raisonnement de la fertilisation minérale azotée complémentaire à tous les traitements organiques n'est pas connu, il est difficile de savoir si cette fertilisation répondait aux besoins des plantes. La présence de la pente pourrait expliquer les faibles teneurs retrouvées pour le témoin à fertilisation haute, comme précisé précédemment.

Les résultats semblent cependant montrer que les teneurs initiales dans les PRO en N total sont étroitement liées aux teneurs retrouvées par la suite dans le sol, et que des apports rapprochés dans le temps permettent de maintenir les concentrations en azote à des niveaux plus élevés qu'en l'absence d'apports de PRO.

- Valeur amendante

Les PRO semblent être de bons moyens d'augmenter les teneurs en Corg du sol pour **La Bouzule** (Figure 5) par rapport aux traitements en fertilisation minérale, et donc de relever les taux de matière organique des sols, mais cela devrait être confirmé par des analyses statistiques temporelles.

- Rendements

Avec une valeur fertilisante qui augmente pour le P, une augmentation des rendements pourrait être observée. L'augmentation des rendements est visible pour les traitements à base de boue

pour **La Bouzule**, ce qui est en adéquation avec les observations précédentes, mais cette différence n'est pas significative. La baisse de rendement en 2001 pourrait s'expliquer par l'absence d'épandage de PRO depuis trois ans, et par des conditions météorologiques défavorables. Les épandages de PRO l'année suivante pourraient expliquer l'augmentation des rendements par rapport aux témoins. Ces résultats semblent montrer que seuls les traitements à base de boue de STEP non compostée permettent de maintenir les rendements aux mêmes niveaux qu'avec une fertilisation minérale optimale, et pourraient donc servir de substitut à une partie des fertilisants minéraux s'ils sont complétés avec une fertilisation minérale basse.

Sur **Ambarès**, la baisse des rendements sur tous les traitements pourrait avoir plusieurs explications qui ne peuvent être vérifiées, comme les conditions climatiques, la présence de ravageurs ou l'absence d'irrigation en cas de sécheresse. De plus, le sol d'Ambarès est sableux et acide, or la fertilité de ces sols est moindre que pour un sol limoneux à pH neutre, par exemple, ce qui pourrait expliquer ces baisses en cas de monoculture de maïs. Les traitements organiques permettent ici de maintenir les rendements aux mêmes niveaux que le témoin, notamment ceux à base de boue de STEP, ce qui est en accord avec les observations sur La Bouzule.

4.3. Impacts environnementaux des PRO sur les sols et les cultures

Au cours de l'essai, toutes les parcelles d'**Ambarès** se sont enrichies en ETM, même les témoins pour lesquels les teneurs auraient dû rester basses. Les parcelles situées à proximité directe des parcelles ayant reçu 100t de boue dans le sens du labour présentaient systématiquement des teneurs plus élevées que les parcelles éloignées de B100, quel que soit le traitement. Cette contamination semble se faire dans le sens ou à contre sens de la pente. Les particules amendées avec B100 auraient donc pu être entraînées par le ruissellement d'eau de pluie, ou transportées via le labour effectué le long de la pente.

Les teneurs en ETM dans les produits épandus sur Ambarès sont comparées par rapport aux valeurs limites concernant les teneurs en ETM des PRO avant épandage (Annexes V et VI). On remarque que les boues de station d'épuration épandues sur le dispositif d'Ambarès étaient majoritairement contaminées en Zn et Mn. Pour Zn et Cd, les teneurs dans les boues sont presque toujours supérieures aux valeurs limites, respectivement de 3000 et 10 mg.kg⁻¹ MS (Annexe V), et jusqu'à 5 fois supérieures aux préconisations en 1982 pour Zn, dont les teneurs sont de 15 600 mg.kg⁻¹ MS de boue. Le manganèse n'est pas considéré comme un contaminant dans la législation, pourtant on remarque ici que les doses sont très importantes, de l'ordre de 5 000 mg.kg⁻¹ jusqu'à 23 213 mg.kg⁻¹, ce qui est largement supérieur aux autres ETM. Concernant les flux annuels moyens de métaux sur 10 ans (Tableau 7), on remarque qu'ils sont très largement supérieurs aux valeurs de la législation, en particulier pour Zn et Pb à cause des valeurs de 1982 pour Zn (Annexe V) et de 1974 à 1978 puis en 1984 et 1985 pour Pb. Cela pourrait expliquer les teneurs élevées retrouvées dans les sols pour le traitement B10 (Figures 9 et 10, Annexe II). Pour Ambarès, il semble qu'il y ait une accumulation des métaux dans le sol quels que soient les traitements, même les témoins, et que les teneurs en ETM augmentent en fonction des teneurs initiales dans les PRO, hormis pour le témoin qui a été contaminé. La baisse des teneurs en ETM dans les sols en fin d'essai peuvent être attribuées à l'arrêt des épandages et par le prélèvement par les plantes. Il est possible qu'il y ait eu un phénomène de lessivage des métaux, il faudrait pour cela étudier l'évolution des métaux dans les horizons plus profonds.

Pour **La Bouzule**, les résultats dans le sol ne montrent pas de phénomène d'augmentation ou d'accumulation de métaux en horizon superficiel, qui restent stables autour de 60 mg.kg⁻¹ pour le Ni, 40 mg.kg⁻¹ pour le Pb, 30 mg.kg⁻¹ pour le Cu et 150 mg.kg⁻¹ pour le Zn. Les teneurs initiales dans les sols pour les ETM étaient généralement plus élevées pour La Bouzule que pour Ambarès, il est donc difficile de comparer les observations. Le type de sol pourrait être l'un des facteurs explicatifs, puisque les sols de La Bouzule, argileux, sont généralement riches en ETM même si

l'on observe des variations importante au niveau des sols français, au contraire des sols sableux comme sur Ambarès, pauvres en ETM (Baize, 1994).

Le fumier présente généralement des teneurs initiales dans le PRO en-deçà de la limite (Annexe VI), aussi bien pour les teneurs initiales en ETM que pour les flux moyens annuels (Tableau 7).

Tableau 7 : Flux annuels moyens de métaux sur 10 ans pour les PRO épandus, exprimés en $g \cdot ha^{-1}$, comparés avec les flux maximaux autorisés par les normes AFNOR NF U 44-095 et NF U 44-051 relatives à l'épandage de boue et de fumier (en rouge : valeur supérieure au flux maximal autorisé)

	Boue		Norme AFNOR (boues)	Fumier		Norme AFNOR (fumier)
	1974-1983	1984-1993		1978-1987	1984-1993	
Fe	338,7	250,555556	/	21,7	48,4	/
Mn	61359	58241,1111	/	4645,7	3124	/
Zn	52656	37401,1111	3000	2093,2	1358	6000
Cu	2384	2290	1000	592,7	280	3000
Cd	371	234,444444	15	12,4	9	45
Cr	725	836,666667	600	905,5	849	1800
Ni	1139	465,555556	300	334,3	292	900
Pb	8374	7344,44444	900	426,7	362	2700

Les analyses des métaux dans la 6^e feuille de maïs, stade jeune de développement où les racines sont dans l'horizon d'incorporation des PRO, permettent d'étudier la disponibilité des ETM pour les végétaux, tandis que les analyses sur les grains apportent des informations sur les transferts vers les produits alimentaires. La disponibilité semble importante pour Zn, mais pas pour les autres éléments, ce qui pourrait être dû aux contaminations importantes en Zn des PRO, qui ont donc pu se retrouver dans les végétaux. Pour Mn, c'est le témoin qui semble présenter le plus de fraction disponible, ce qui peut confirmer la thèse de la contamination mais ne se justifie pas par la composition du traitement minéral initialement apporté. Dans les sols acides et sableux comme sur Ambarès, les ETM ont tendance à être très disponibles car plus solubles (Perrono,1999) que dans des sols neutres, c'est pourquoi la législation fixe le pH minimal des sols pouvant recevoir des boues à 6. Cela ne semble confirmé que pour le Zn. Une accumulation de Zn dans les grains est observée, surtout pour le traitement B10, cela suggère qu'il peut y avoir un transfert de contaminant vers le produit alimentaire en cas de teneurs excessives en ETM. Les variations observées pour Fe et Zn ne semblent pas justifiées par les teneurs en ETM des PRO qui ne varient pas de la même manière.

Conclusion

Mon stage s'est inscrit dans le programme de recherche SOERE-PRO, orchestré par l'INRA de Versailles-Grignon, pour l'observation et la conduite d'essais sur la thématique du recyclage agricole sur le long terme de produits résiduels organiques (PRO). Il avait pour objectif la validation statistique et agronomique de jeux de données issues de deux sites expérimentaux de l'INRA dans des contextes pédoclimatiques différents, La Bouzule en Lorraine et Couhins en Aquitaine, ce dernier constitué de trois dispositifs, Ambarès, Louis Fargue et Saint-Denis-de-Pile. Pour cela, les données concernant la conduite globale des essais et des compartiments PRO, sol et plante ont été collectées puis mises en forme. Elles ont pu être insérées dans un fichier de saisie Excel destiné à fournir une base de données pour le programme. Cette base permettra d'offrir à ses utilisateurs une transparence sur la qualité statistique des jeux de données, et de fournir des informations de manière rapide et efficace. Le logiciel Statbox a permis le traitement statistique des jeux de données grâce des ANOVA (analyses de variances) pour chaque date de prélèvement et chaque variable étudiée.

La durée du stage n'a pas permis de valider et d'exploiter la totalité des jeux de données, c'est pourquoi seuls deux dispositifs, La Bouzule et Ambarès, sont présentés dans le rapport. L'essai de La Bouzule, débuté en 1996 et terminé en 2005, testait l'apport de huit PRO de nature différente compensés avec une fertilisation minérale basse, en comparaison avec deux témoins en fertilisation minérale basse et optimale. L'expérimentation avait été menée pour étudier principalement les effets écotoxicologiques et environnementaux de l'épandage de produits organiques, sans appuyer les aspects fertilisants. Le dispositif d'Ambarès, essai lancé en 1974 et arrêté en 2001, testait l'apport de 3 PRO dont une boue de STEP à deux niveaux et un fumier par rapport à un témoin en fertilisation minérale. Il étudiait les transferts sol-plante après épandage de PRO.

L'exploitation des données carbone organique, azote total, phosphore et ETM du sol, et des données azote, phosphore, rendements et ETM des végétaux ont donc apporté des informations supplémentaires sur les effets agronomiques et environnementaux du recyclage agricole des PRO. Les résultats des parcelles ayant reçu 100t de boue /ha sur Ambarès n'ont pas été pris en compte dans la validation des données car elles masquaient l'effet des autres traitements, et car ce dosage est éloigné des pratiques agricoles courantes.

L'exploitation statistique a pu valider les données des compartiments analysés la plupart du temps en remplissant les conditions d'application de l'ANOVA. Les résidus suspects, détectés par la méthode de Grubbs ont pu être corrigés grâce à l'estimation de Yates. Des tests non paramétriques, réalisés lorsque des interactions « bloc x traitement » et lorsque les écart-types non égaux ne permettaient pas de remplir les conditions de l'ANOVA, ont permis de conclure sur la significativité des différences entre les traitements. L'existence de pentes inférieures à 2 % dans les dispositifs ont eu des impacts sur les résultats. Pour **la Bouzule**, la répartition des argiles de surface dans le dispositif à partir du haut du bloc 2 jusqu'au bas du bloc 4 a montré un gradient pour les données C et N, ne permettant pas de traitement statistique à certaines dates et pouvant entraîner des biais dans l'exploitation des données pour ces paramètres, notamment pour le témoin en fertilisation optimale concentré dans le haut du dispositif. Pour **Ambarès**, l'existence d'une pente, associée à un labour réalisé dans le sens de cette pente a pu entraîner les particules des parcelles amendées avec des quantités très importantes en boues a pu contaminer les parcelles, notamment les témoins situés à proximité de ces parcelles.

Concernant la valeur fertilisante des PRO, les boues biologiques de STEP, naturellement riches en phosphore bio-disponible, ont permis d'augmenter de manière significative (test de Newman-Keuls) les teneurs en P_2O_5 Olsen des sols de **La Bouzule** par rapport aux sols ayant reçu d'autres

traitements, mais pas d'augmenter les rendements de manière significative. Les compostages ou procédés de traitement des boues tels que la déshydratation semblent avoir tendance à faire diminuer les teneurs en P disponible pour les plantes, c'est pourquoi les compost de boues avec déchets verts (DVB) n'ont pas permis d'atteindre les teneurs en P_2O_5 des sols traités aux boues de station partiellement déshydratée. La valeur fertilisante phosphatée n'est pas confirmée pour les boues de papeterie, cendres de combustion, et compost d'ordures ménagères, traitements naturellement pauvres en P_2O_5 . Les boues de STEP et composts DVB semblent donc être de bons fertilisants phosphatés si les apports sont proches et répétés, et les rendements semblent équivalents au témoin en fertilisation minérale optimale pour les boues de STEP. Pour **Ambarès**, les boues de STEP contiendraient des teneurs en P disponible faibles par rapport aux autres traitements, mais semblent permettre d'obtenir de meilleurs rendements sans que cela soit significatif.

Les PRO en tant que fertilisants azotés sont difficiles à confirmer pour La Bouzule, puisque les différences entre les traitements organiques et minérales n'étaient pas toujours significatives. L'usage de PRO pour leur valeur amendante a pu montrer que les stocks de carbone, et donc de matière organique, augmentaient lorsque les apports étaient rapprochés dans le temps, pour mais qu'ils diminuaient progressivement en l'absence d'apports. Pour ces deux paramètres, la présence la pente limite les conclusions.

Sur **Ambarès**, on a remarqué des contaminations en Zn et Mn importantes dans les boues de STEP, et des teneurs supérieures aux valeurs limites posées par la législation pour les autres ETM. Une accumulation de ces ETM dans le temps a été mise en avant dans l'horizon superficiel du sol. Un transfert de Zn dans les feuilles et grains de maïs semble avoir eu lieu, les fortes teneurs initiales dans le PRO et la nature du sol, sableux et acide qui rend les ETM disponibles, semblent en être des causes probables. Le fumier présentait des teneurs initiales conformes aux recommandations de la législation et les teneurs dans les sols étaient les mêmes que les témoins et semblent donc présenter peu de risques. Pour **La Bouzule**, les teneurs dans les sols étaient plus importantes initialement mais aucun phénomène d'accumulation n'a été visible.

Ce stage a permis de valider des données sur le plan statistique. La liaison avec les réalités agronomiques n'a pas toujours été possible du fait des objectifs initiaux des études. Les données mutualisées dans le fichier de saisie permettront une analyse plus poussée des résultats obtenus en prenant en compte l'ensemble de l'itinéraire technique, avec une possible mise en relation avec des contextes pédoclimatiques proches. Un futur stage possible pourrait être la réalisation d'analyses statistiques temporelles afin d'observer les effets de l'usage de PRO dans le temps et de confirmer les observations faites jusqu'à présent.

Bibliographie

- Adriano, D.C., 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, bioavailability and Risks of Metals, 2nd edition, Springer, New York.
- Baize D, 1994. Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français, premiers résultats du programme ASPITET. Le Courrier de l'environnement de l'INRA n°22, p. 37-48.
- Bell A, Michaud A, De Chezelles E, Houot S 2013, « Réseau PRO »: analyzing the French context of field experiments assessing agronomic, environmental and sanitary impacts of organic residues recycled in agriculture, présentation orale, RAMIRAN 2013.
- Chang A., Page A., Warneke J., 1987. Long term sludge applications on cadmium and zinc accumulation in swiss chard and radish. *Journal of Environmental Quality*, 16, 217-221.
- Dernat M., Elmerich P., Pouillot M., 1994. Vers une optimisation de la déphosphatation physico-chimique. *L'eau, L'industrie, les Nuisances*, n°182, p. 31-38.
- Deronzier G, Choubert J.M., 2004. Traitement du phosphore dans les petites stations d'épuration à boues activées. Comparaisons techniques et économiques des voies de traitement biologique et physico-chimique. Document technique FNDAE n°29.
- Fardeau J.C, 2000. Estimation de la biodisponibilité des éléments nutritifs contenus dans les produits résiduaux organiques. *Ingénieries*, n°21, p. 15-28.
- Genot V., Coinet G., Brahy V., Bock L., 2007. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne. *Biotechnolo. Agron. Soc. Environ.*, 121-138.
- Houot S., Bodineau G., Rampon J.N., Le Villio-Poitrenaud M., Monteach D., Schaub A., Imhoff M., 2007. Effet de l'apport de produits résiduaux organiques sur la matière organique des sols. Journée technique « retour au sol des produits résiduaux organiques », Colmar, p 54-67.
- Houot S., Duparque A., Damay N., Mary B., 2009. Les valeurs amendantes des produits résiduaux organiques : « L'utilisation des produits organiques pour fertiliser les cultures et amender les sols dans une agriculture durable », présentation orale, Journée COMIFER Académie d'Agriculture.
- Mazoyer M., Roudart L., 2002. *Histoire des agricultures du monde : du néolithique à la crise contemporaine*, éditions Points, 658p.
- Morel J.L., Guckert A., 1984. Evolution en plein champ de la solubilité dans DTPA des métaux lourds du sol introduits par des épandages de boues urbaines chaulées. *Agronomie*, 4:377-386.
- Peijnenburg W. & Jager T., 2003. Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: Matrix issues. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 56 63-77.
- Perrono P., 1999. Les micro-polluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduaux urbaines et l'épandage agricole, Mém. D.U.E.S.S., D.E.O., Université de Picardie.
- Petersen S.O, Henriksen K., Mortensen G.K., Krogh P.H., Brandt K.K., Sorensen J., Madsen T., Petersen J., Gron C., 2002. Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants and impact on soil fertility. *Soil & Tillage Research*, 139-152.
- Renner R., 2000. Sewage sludge: Pros & cons. *Environmental Science & Technology*, Vol. 34 n°19, p. 430-435.

Roldàn A., Albaladejo J., Thornes JB., 1998. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. *Arid soil research and rehabilitation*.

Schwartz C., Sere G., Florentin L., Morel J.L., 2003. Evaluation des risques écotoxicologiques liés à la valorisation agricole des déchets et produits dérivés. Rapport final du contrat ADEME n° 97 75 001.

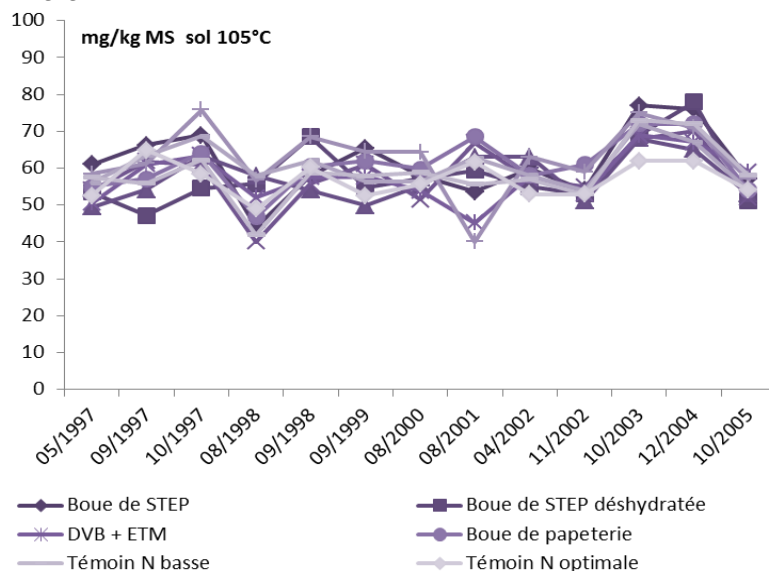
Servigne S, 2013. Systèmes Informatiques - Conception, architecture et urbanisation des systèmes d'information ». *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 14 juin 2013. Disponible sur : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/systemes-informatiques-conception-architecture-et-urbanisation-des-systemes-d-information/>

Vilain M., 1999. *Méthodes expérimentales en agronomie*, Ted Doc Lavoisier, Chapitres 9 « Notions générales sur l'expérimentation » et 10 « Essais et dispositifs expérimentaux », p.130-151.

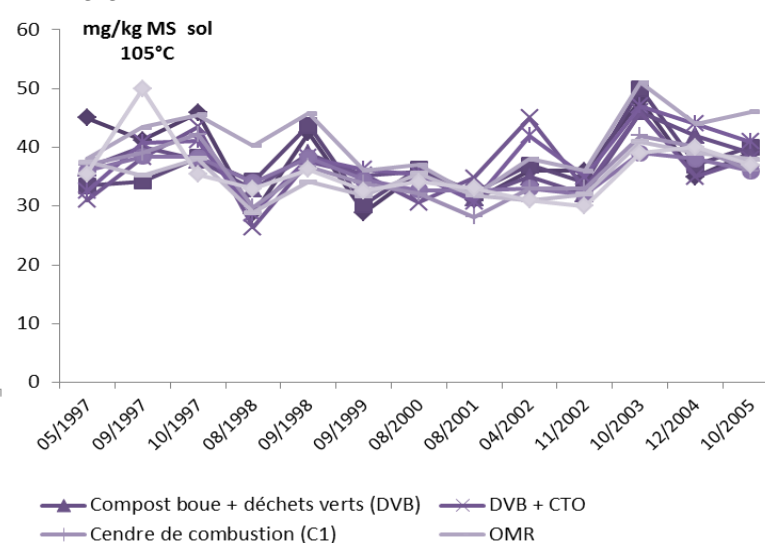
Werner W., Warnusz J., 1997. Ecological evaluation of long-term application of sewage sludges according to the legislative permissions, présentation orale, 13th International Plan Nutrition Colloquium

Annexe I : Teneurs moyennes en ETM dans le sol du dispositif de La Bouzule, exprimées en mg.kg de MS⁻¹ de sol en horizon superficiel (0-25 cm) :
I.1. Nickel ; I.2. Plomb, I.3. Cuivre ; I.4. Zinc (ETM = élément trace métallique, CTO = composé trace organique, OMR = compost d'ordures ménagères)

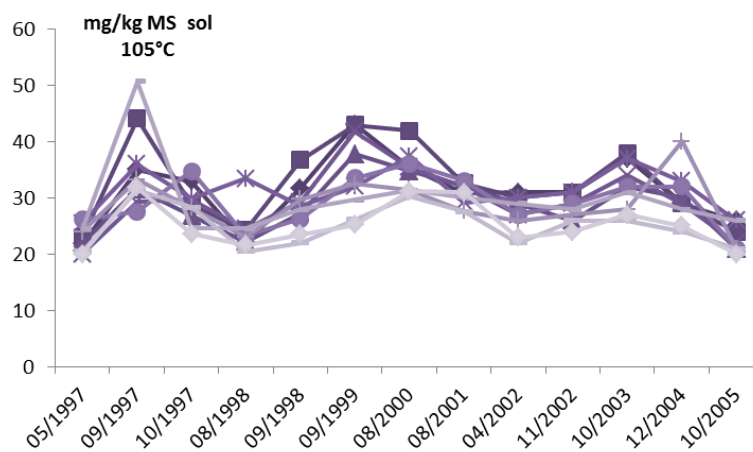
Annexe I.1.



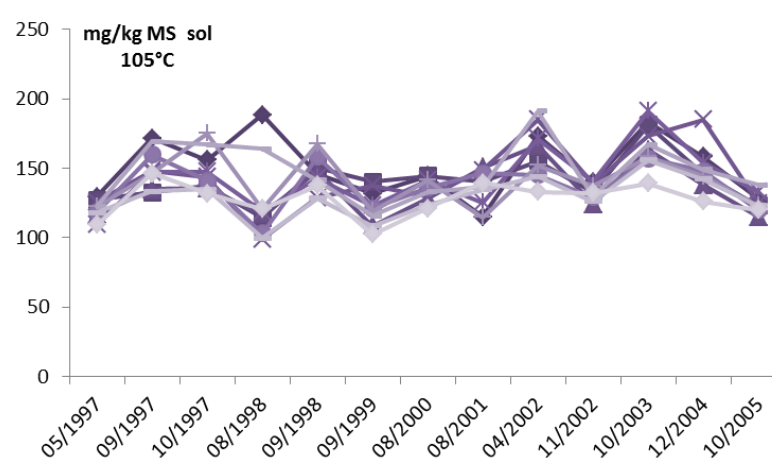
Annexe I.2.



Annexe I.3.



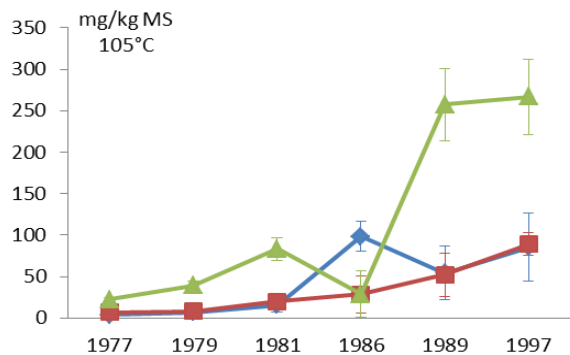
Annexe I.4.



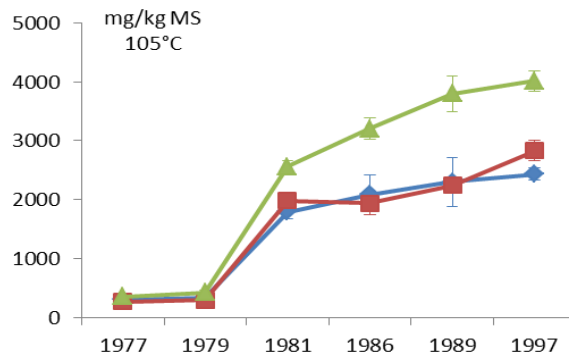
Annexe II : Teneurs moyennes en ETM dans le sol du site d'Ambarès en horizon superficiel (0-20 cm), exprimées en mg.kg⁻¹ de MS de sol à 105°C :

II.1. Zinc, II.2. Fer, II.3. Plomb, II.4. Cadmium, II.5. Nickel II.6. Chrome

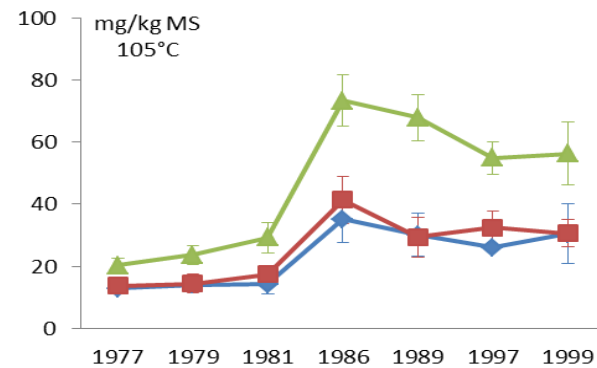
Figure II.1



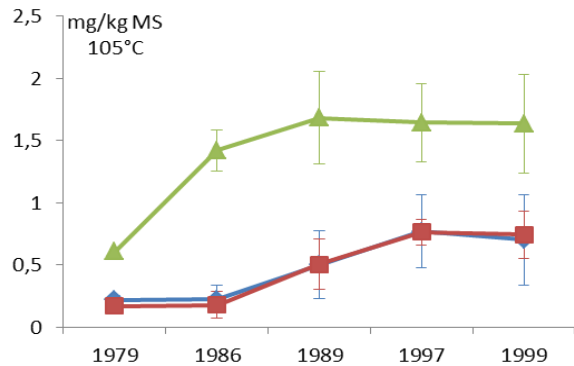
Annexe II.2



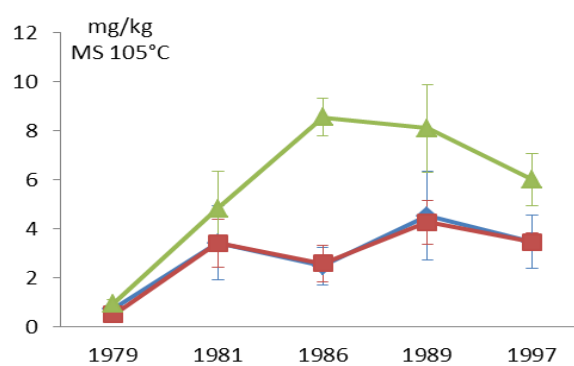
Annexe II.3



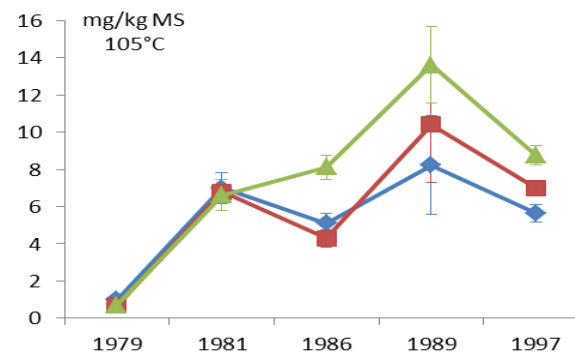
Annexe II.4



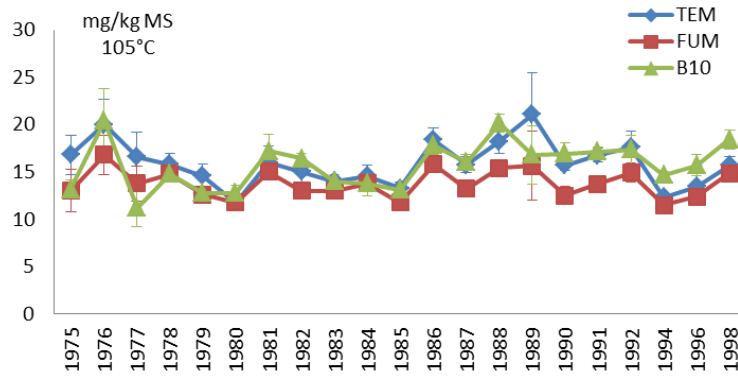
Annexe II.5



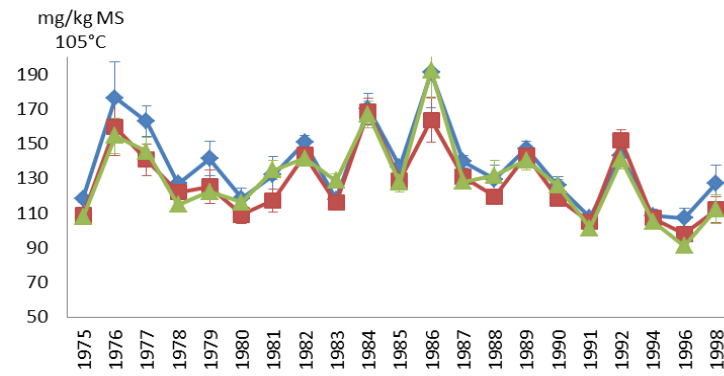
Annexe II.6



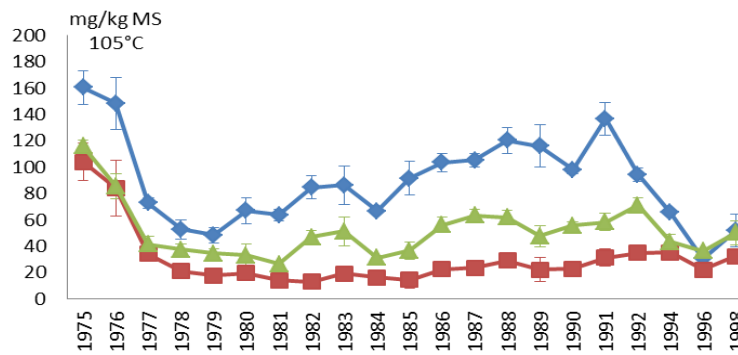
Annexe 19.1



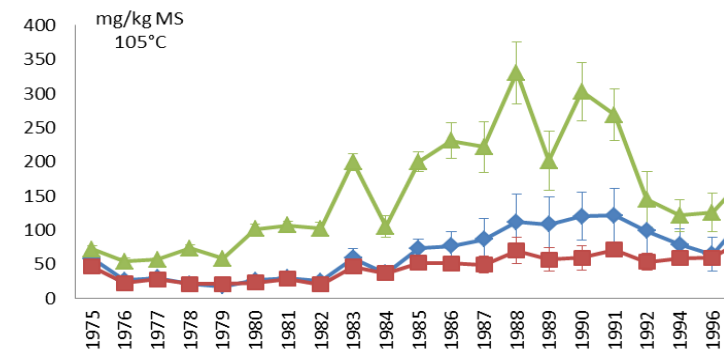
Annexe III.2



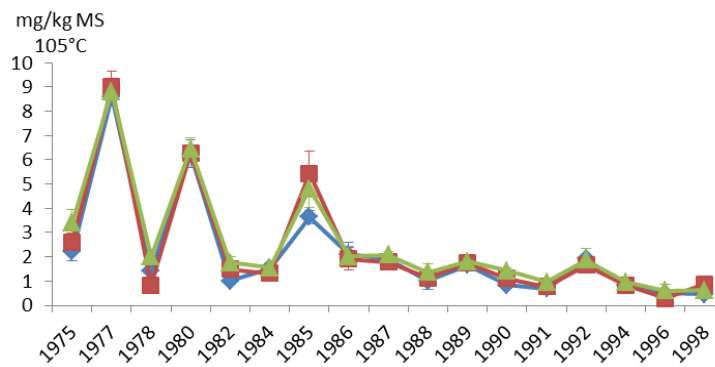
Annexe III.3



Annexe III.4



Annexe III.5

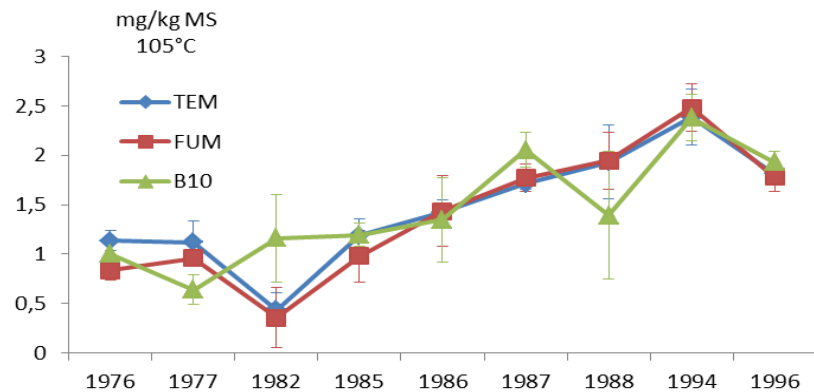


Annexe II : Teneurs en éléments traces dans la 6^e feuille de maïs au stade 10-12 feuilles du dispositif d'Ambarès, exprimées en mg/kg de MS de feuille à 105°C :

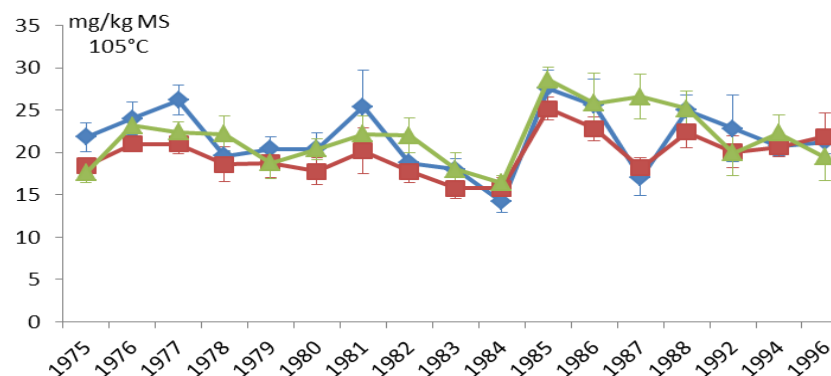
- III.1. Cuivre
- III.2. Fer
- III.3. Manganèse
- III.4. Zinc
- III.5. Plomb

Annexe IV : Teneurs en éléments traces dans les grains de maïs du dispositif d'Ambarès, exprimées en mg/kg de MS de grain à 105°C :
IV.1. Cuivre, IV.2. Fer, IV.3. Cadmium, IV.4. Chrome

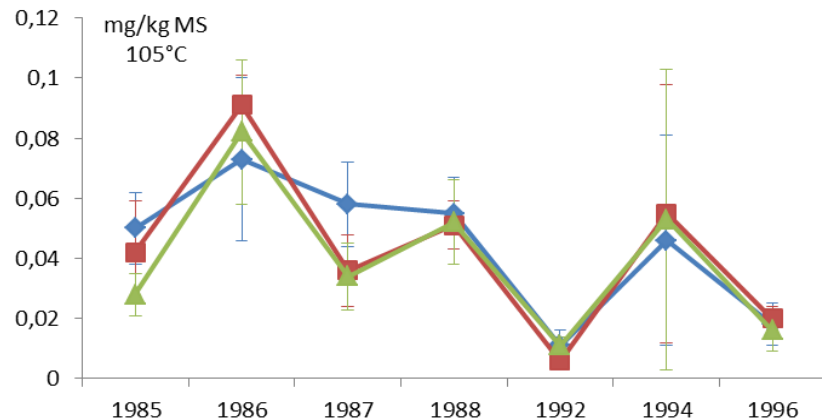
Annexe 20.1



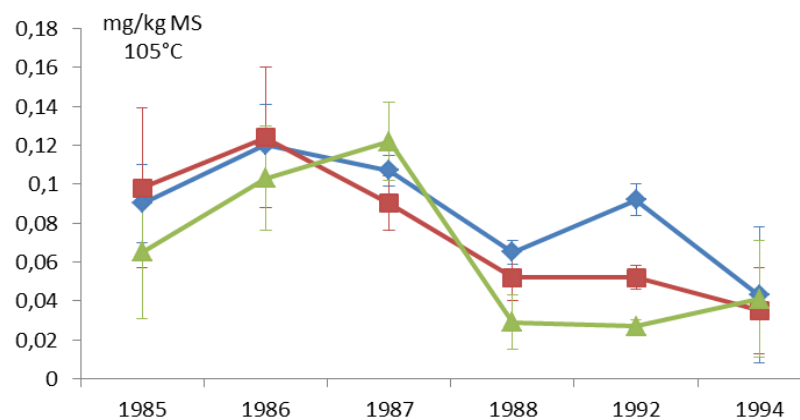
Annexe IV.2.



Annexe IV.3.



Annexe IV.4.



Annexe V : Teneurs en éléments traces dans les boues épandues sur les parcelles d'Ambarès, analysées avant chaque épandage, exprimées en mg/kg MS 105°C. Teneurs dans la boue comparées avec la norme AFNOR NF U 44-095 concernant les teneurs limites en éléments traces des matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux (en rouge : teneurs supérieures aux valeurs limites).

	Fe (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)	Mn (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)	Zn (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)		Cu (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)		Cd (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)		Cr (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)		Ni (mg.kg ⁻¹ MS 105°C)		Pb (mg/kg MS 105°C)	
	Boue	Boue	Boue	Valeur limite	Boue	Valeur limite	Boue	Valeur limite	Boue	Valeur limite	Boue	Valeur limite	Boue	Valeur limite
1974	16,5	440	2450	3000	254	1000	60	10	30	1000	90	200	1164	800
1975	21	1420	2850	3000	282	1000	60	10	30	1000	90	200	1272	800
1976	23,5	2400	3250	3000	310	1000	60	10	30	1000	90	200	1380	800
1977	38,9	5767	4942	3000	286	1000	49	10	52	1000	154	200	1103	800
1978	54,2	9134	6634	3000	261	1000	37	10	75	1000	218	200	825	800
1979	42	7650	6375	3000	266	1000	28	10	87	1000	182	200	759	800
1980	37,7	6325	5835	3000	257	1000	32	10	84	1000	176	200	845	800
1981	20,4	3780	3180	3000	212	1000	31	10	55	1000	118	200	792	800
1982	75,9	23213	15600	3000	136	1000	8	10	76	1000	500	200	205	800
1983	8,6	1230	1540	3000	120	1000	6	10	206	1000	21	200	29	800
1984	24,7	9900	5500	3000	147	1000	15	10	267	1000	72	200	1480	800
1985	50	12700	6800	3000	259	1000	21	10	90	1000	69	200	2340	800
1986	33,1	6380	4550	3000	206	1000	43	10	82	1000	51	200	675	800
1987	29,4	5598	3068	3000	219	1000	18	10	69	1000	56	200	489	800
1988	31,7	5840	3300	3000	237	1000	19	10	76	1000	60	200	529	800
1989	19,4	4040	2520	3000	224	1000	8	10	52	1000	37	200	170	800
1990	12,9	2750	2580	3000	217	1000	36	10	43	1000	20	200	307	800
1991	12,5	2468	2374	3000	242	1000	15	10	58	1000	30	200	273	800
1992	3,8	619	824	3000	120	1000	6	10	16	1000	8	200	112	800
1993	8	2122	2145	3000	190	1000	30	10	/	1000	16	200	235	800

Annexe VI : Teneurs en éléments traces dans les fumiers épandus sur les parcelles d'Ambarès, analysés avant chaque épandage, exprimées en mg/kg MS 105°C. Teneurs dans les fumiers comparées avec la norme AFNOR NF U 44-051 concernant notamment les fumiers (en rouge : teneurs supérieures aux valeurs limites).

	Fe (mg/kg MS 105°C)		Mn (mg/kg MS 105°C)		Zn (mg/kg MS 105°C)		Cu (mg/kg MS 105°C)		Cd (mg/kg MS 105°C)		Cr (mg/kg MS 105°C)		Ni (mg/kg MS 105°C)		Pb (mg/kg MS 105°C)	
	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite	Fumier	Valeur limite
1978	0,1	600	19,7	600	130,2	600	23,7	300	1	3	3,9	120	6,9	60	11,1	180
1979	0,7	600	183	600	92	600	21	300	1	3	6	120	4	60	8	180
1980	0,9	600	263	600	105	600	20	300	0	3	8	120	9	60	21	180
1981	1,7	600	332	600	116	600	200	300	0,4	3	11,6	120	8	60	6,6	180
1982	3,1	600	420	600	184	600	28	300	0,8	3	13	120	7,2	60	8,6	180
1983	1,6	600	304	600	108	600	20	300	0,2	3	14	120	7,2	60	9,4	180
1984	7,4	600	382	600	220	600	37	300	1	3	538	120	56	60	85	180
1985	0,7	600	347	600	240	600	34	300	1	3	6	120	4	60	2	180
1986	3,5	600	559	600	109	600	17	300	1	3	21	120	11	60	6	180
1987	2	600	186	600	106	600	12	300	0	3	14	120	11	60	9	180
1988	8,7	600	303	600	145	600	41	300	0	3	76	120	68	60	19	180
1989	12	600	405	600	195	600	54	300	2	3	86	120	63	60	168	180
1990	1,5	600	141	600	46	600	14	300	2	3	8	120	4	60	4	180
1991	4,3	600	226	600	88	600	16	300	0	3	83	120	65	60	2	180
1992	3,4	600	305	600	134	600	30	300	1	3	7	120	3	60	13	180
1993	4,9	600	270	600	75	600	25	300	1	3	10	120	7	60	54	180

RÉSUMÉ

Sujet : Validation statistique et agronomique de données issues d'expérimentations sur le recyclage agricole de produits résiduels organiques.

Mots-clés : produits résiduels organiques (PRO), validation statistique, fertilisation organique, éléments traces métalliques (ETM).

Les fertilisants minéraux sont actuellement majoritairement utilisés en agriculture. Face à la diminution des ressources minérales et à l'augmentation des prix des engrais, les produits résiduels organiques (PRO) tels que les boues d'épuration, composts d'ordures ménagères ou effluents d'élevage se présentent comme des substituts potentiels aux engrais grâce à leur valeur fertilisante. Leurs intérêts agronomiques sont reconnus, comme le stockage du carbone (C) par maintien du taux de matière organique ou leur valeur fertilisante (Houot S, 2009). Il est nécessaire d'assurer un recyclage optimal des PRO en limitant les éventuels risques environnementaux et sanitaires liés à la composition des PRO (*i.e.* risques de contamination des sols par des polluants métalliques, organiques ou biologiques) (Morel et Guckert, 1984), et les risques de mauvaise gestion des apports d'éléments fertilisants (*e.g.* pertes de nitrates). Les effets à long terme des épandages de PRO nécessitent aussi plus de connaissances.

Le SOERE-PRO, système d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement, piloté par l'INRA, étudie les impacts environnementaux du recyclage agricole des PRO sur les écosystèmes. Il regroupe des sites expérimentations de longue durée (> 20 ans) au champ conduits de façon coordonnée, dont les données seront mutualisées au sein des mêmes bases de données. Il a pour but d'apporter des connaissances scientifiques sur l'effet des épandages de PRO à long terme dans différents contextes pédoclimatiques et d'étudier la résilience des agrosystèmes après arrêt des épandages. Le stage a pour objectif : (i) la saisie de données expérimentales des compartiments sol, plante, PRO acquises sur 4 dispositifs du SOERE PRO dans un fichier de saisie Excel, (ii) la validation statistique des jeux de données saisies sur Statbox et (iii) une interprétation statistique et agronomique des effets observés. Les dispositifs de La Bouzule (Lorraine), et Ambarès (Aquitaine), sont décrits dans le rapport. Les essais testent respectivement l'apport de 8 PRO par rapport à deux témoins en fertilisation minérale azotée, et l'apport de 3 PRO par rapport à un témoin en fertilisation minérale. Ces dispositifs ont pu être validés statistiquement, après transformation des résidus suspects (formule de Yates) et passage à des tests non paramétriques lorsque les conditions de l'ANOVA n'étaient pas remplies.

Les boues de station d'épuration urbaine (STEP), riches en P, ont permis de remonter de manière significative par rapport aux autres traitements les teneurs en P disponible dans les sols de La Bouzule, notamment quand les apports étaient rapprochés dans le temps, et d'augmenter les teneurs en P total sur Ambarès. Comme attendu, les concentrations en C organique ont augmenté dans les sols de la Bouzule ayant reçu des traitements organiques par rapport aux témoins en fertilisation minérale, mais peu de résultats sont concluants concernant le N total. La présence d'une pente (< 2%) détectée par les traitements statistiques empêche d'émettre des conclusions pertinentes sur les paramètres C et N, potentiellement entraînés par les argiles de surface. Les traitements à base de boue permettent d'atteindre les rendements des témoins en fertilisation minérale optimale pour La Bouzule, tandis qu'ils ont diminué tout au long de l'essai sur Ambarès. Une pente (<2%) sur Ambarès et une disposition parallèle des blocs par rapport à la pente serait à l'origine d'une contamination en éléments traces métalliques (ETM) des parcelles témoins voisines. Les traitements à base de boue de STEP sur Ambarès, contaminées en Zn et Mn principalement, seraient à l'origine d'une contamination des sols de manière significative par rapport aux autres traitements, et une accumulation d'ETM dans les sols des parcelles ayant reçu ce traitement, phénomène non remarquable sur La Bouzule. Le Zn semble disponible dans les sols sableux et acides d'Ambarès avec un transfert dans les grains de maïs.