

Analyse de la valeur agronomique de produits résiduels organiques (PRO) à partir d'une expérimentation de longue durée



2 rue de Rome
BP30022 SCHILTIGHEIM
67013 STASBOURG cedex



Remerciements

Je remercie tout d'abord Anne Schaub, ma maître de stage, pour m'avoir permis de réaliser cette mission au sein de l'ARAA, pour sa disponibilité et son encadrement bien que nous ne travaillions pas sur le même site.

Je remercie particulièrement Marc Lollier, par qui j'ai eu connaissance du stage, et qui a été d'une aide importante pour les aspects statistiques de ce rapport notamment.

Enfin, je remercie Denis Montenach pour son accueil à l'INRA et sa disponibilité.

Je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer lors d'échanges sur le réseau SOERE PRO et le Réseau PRO, de m'avoir permis de découvrir le monde de la recherche, l'importance mais aussi la difficulté du travail en réseau sur des expérimentations longue durée telles que celle de Colmar.

Lexique

Casdar : compte d'affectation spéciale pour le développement agricole et rural, alimenté par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.

CEC : Capacité d'Echange Cationique.

Chaulage : Méthode de stabilisation des boues d'épuration par ajout de chaux éteinte ou vive (l'augmentation du pH limite l'activité biologique et donc la fermentescibilité).

INRA : Institut National de Recherche Agronomique.

LDAR : Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche de L'Aisne, basé à Laon (02).

MO : Matière Organique.

SMRA 68 : Syndicat Mixte de Recyclage Agricole du Haut-Rhin (Biopôle de Colmar), encadre, expertise et conseille le recyclage agricole des boues de stations d'épuration et autres effluents non agricoles.

Sommaire

Remerciements	
Lexique	
Sommaire	
I. INTRODUCTION	1
I.1. La structure d'accueil	1
I.2. Les produits résiduels organiques, ou PRO	2
Définition	2
Intérêts en agriculture	2
Enjeux	2
Réglementation	3
I.3. Les objectifs et l'organisation de la recherche sur les PRO, en réseau et à Colmar	4
Pourquoi faire des essais ?	4
Les réseaux	4
L'essai de Colmar	5
Ma mission : un bilan agronomique et économique après 12 ans d'expérimentation	5
II. MATERIELS ET METHODES	7
II.1. L'essai	7
Mise en place de la parcelle	7
Paramètres suivis et mesures réalisées	8
II.2. L'analyse agronomique	9
Les fichiers de données initiaux et leur structuration	9
La stratégie d'analyse	10
La validation des analyses	11
La représentation graphique des résultats	11
II.3. L'analyse économique	11
III. RESULTATS ET DISCUSSION	13
III. 1. Résultats agronomiques	13
Rendement obtenus après 12 ans d'épandages	13
Etat du sol après 12 ans d'épandages	15
Les bilans N, P et K	19
Conclusion agronomique	21
III.2. Les résultats économiques	22
IV. CONCLUSION	23
Bibliographie	

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de mon DUT, j'ai effectué un stage de 14 semaines au sein de l'ARAA, l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace. J'ai réalisé une synthèse des résultats d'un essai longue durée sur la valorisation agricole des Produits Résiduaire Organiques, ou PRO. L'essai, en place depuis 12 ans sur le site de l'INRA* de Colmar, fait partie d'un réseau national d'essais auquel l'ARAA et l'INRA participent.

I.1. La structure d'accueil

L'ARAA a été créée en 1984 dans le but de mettre en place des recherches agronomiques liées au territoire de l'Alsace. Le siège de l'ARAA se situe à la Maison de l'agriculture de Schiltigheim, près de Strasbourg. L'équipe est composée de 8 personnes dont un CDD et un poste administratif (document 1).

Anne Schaub, ma maîtresse de stage, travaille à l'ARAA depuis 1997. Elle conduit ou participe à des expérimentations régionales de longue durée sur la durabilité des systèmes de culture et l'impact des produits résiduaire organiques. Elle contribue aussi aux travaux de réseaux nationaux sur ces 2 thématiques (RMT Systèmes de culture innovants, Réseau PRO). Sa mission consiste à concevoir, conduire, analyser des essais, puis à créer et communiquer des ressources utiles aux conseillers, formateurs et agriculteurs, issues des résultats des essais.

L'ARAA, de façon globale, a pour but de faire le lien entre la recherche et le développement, entre les organismes de recherche, les acteurs du territoire (de la qualité de l'eau, par exemple) et les agriculteurs. Elle tient compte auprès de la recherche des questionnements et des attentes des acteurs du monde agricole et des territoires, et transmet les résultats des expérimentations aux prescripteurs des agriculteurs (conseillers agricoles, techniciens des coopératives et négoce). Inversement, les agriculteurs et leurs prescripteurs sont aussi partie prenante dans la recherche de nouvelles solutions. Il s'agit de recherche-développement en interaction et non pas de recherche descendante.

L'ARAA contribue ainsi à la mise en place de nouvelles références accessibles pour les conseillers agricoles, qui peuvent alors répondre de façon plus adaptée aux agriculteurs. Elle travaille notamment sur l'amélioration des connaissances des sols alsaciens afin de renforcer les bases de données régionales ; sur l'évaluation de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols et de l'eau à l'échelle de parcelles agricoles...

L'association est soutenue financièrement par la Région Alsace, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et la Chambre d'Agriculture de la Région Alsace.

Mon stage s'est déroulé sur le Biopôle de Colmar, au sein du Service d'Expérimentation Agronomique et Viticole (SEAV) de l'INRA, qui conduit l'essai. En effet, le SEAV participe à la mise en place –en serre ou en plein champs-, à l'entretien, au suivi et à la saisie des données des dispositifs développés par les unités de recherche de l'INRA de Colmar. Dans ce cadre, l'équipe du SEAV a mis en place le dispositif concernant les PRO, et gère son maintien et son suivi depuis 2000.

Ma présence sur le site m'a permis d'être co-encadrée par Denis Montenach, responsable du suivi technique de l'expérimentation depuis 2006.

Enfin, j'ai pu être soutenue par Marc Lollier, Maître de Conférences au Département Génie Biologique de l'IUT de Colmar (Université de Haute Alsace), plus spécifiquement au niveau des analyses statistiques.

I.2. Les produits résiduaire organiques, ou PRO

Définition

En France, 330 millions de tonnes de produits résiduaire organiques étaient produits en 2010. Les PRO rassemblent des produits d'origine diverse, contenant une fraction organique. C'est un terme générique n'ayant pas de signification juridique. Il comprend les boues de stations d'épuration urbaine et industrielle, les composts déchets vert, les composts de la fraction fermentescible des ordures ménagère, les effluents viti-vinicole, mais aussi, plus connu, les effluents d'élevage.

Ces produits se distinguent des produits résiduaire non-organique, ne contenant pas de part organique mais composé principalement de minéraux, comme les cendres de chaudière à bois.

Les PRO sont utilisable en agriculture de par leurs valeur fertilisante et/ou amendante. Ils sont classés selon leur provenance et leur consistance. Le document 2 présente les principaux PRO épandus en France.

Intérêts en agriculture

Parmi les PRO, les effluents d'élevage sont les plus connus. Utilisés depuis toujours pour fertiliser les sols, ils sont intégrés aux systèmes d'exploitation : produits par les animaux, ils sont valorisés, « recyclés », au niveau des cultures par épandage.

La composition des PRO leur confère deux intérêts principaux que l'on peut différencier : une capacité fertilisante (effet « engrais » : apports de nutriments pour les cultures) et une capacité amendante (amélioration des propriétés du sol).

En effet, les PRO contiennent selon leur nature, une quantité variable d'éléments fertilisants indispensables pour le développement des plantes, tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), le sodium (Na), ou des oligo-éléments comme le cuivre (Cu) ou le zinc (Zn).

L'épandage des PRO peut aussi permettre d'améliorer des propriétés physiques du sol : moins de battance, plus de rétention en eau, plus de rétention des cations nutritifs sur le complexe d'échange. La MO* fraîche des PRO est également source d'alimentation pour la vie du sol, notamment les lombrics, qui concourent à améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol via leurs galeries.

Leur intérêt agronomique diffère selon la composition du PRO et de son éventuel compostage.

Enjeux

Les PRO constituent un gisement important de matière organique mais aussi de matière fertilisante. En Alsace, le gisement total de PRO s'élevait à plus de 2,3 millions de tonnes (document 3). La plus grande part des PRO est constituée des effluents d'élevage. Mais des inégalités apparaissent selon les régions. Certaines régions de France spécialisées dans les grandes cultures ont peu de ressources organiques, tandis que les éleveurs hors-sol

d'autres régions ne peuvent eux-mêmes totalement valoriser leurs produits et doivent les exporter. Ces disparités s'observent notamment au niveau de l'évolution des stocks de carbone dans les sols français, comme le montre le document 4 ; l'Alsace faisant partie des régions céréalières plutôt déficitaires en matières organiques.

Aux importantes quantités d'effluents d'élevage produites tous les ans s'ajoutent aujourd'hui de plus en plus les produits d'origine urbaine ou industrielle. En effet, la société actuelle, à travers les lois en faveur de l'environnement, développe le recyclage. Les quantités de boues industrielles et de collectivités tendent à augmenter avec les normes d'épuration qui deviennent de plus en plus strictes. De la même façon, les objectifs du Grenelle de l'environnement visent à diminuer la production de déchets et augmenter le recyclage, tout en diminuant le stockage et l'incinération de ces déchets. Leur retour au sol est aujourd'hui la solution qui semble la plus adaptée, de par son coût et ses intérêts agronomiques.

De plus, de par leur valeur fertilisante, les PRO constituent aujourd'hui une alternative possible face à l'augmentation des prix des engrais de synthèse, ajoutant à leur intérêt agronomique un intérêt économique non négligeable pour les agriculteurs.

Enfin, les PRO aujourd'hui sont d'origines très diverses. Leur composition est très variable, et par conséquent leurs particularités agronomiques et comportement dans le sol également. Une connaissance plus précise de ces paramètres permettrait de mieux cibler leur compostage et leur utilisation, en fonction des besoins des cultures.

Réglementation

Les PRO sont des déchets d'origines très diverses, et sont donc juridiquement considérés comme tels.

Pour être valorisés en agriculture, les PRO doivent tout d'abord répondre à des critères d'intérêt agronomique et d'innocuité. Ces deux critères suffisent pour que le PRO soit utilisé en agriculture sous le statut « déchet », tout en respectant les réglementations concernant ces derniers : le plan d'épandage mis en place au niveau national, mais aussi les réglementations locales. Le produit ne doit pas dépasser les seuils définis en éléments traces métalliques (ETM), en composés traces organiques (CTO) et en microorganismes pathogènes. La traçabilité du produit doit être assurée, du producteur du déchet à l'agriculteur qui le valorise, mais c'est le producteur qui reste responsable du déchet jusqu'à son élimination. Un suivi des parcelles concernées par l'épandage de ces boues ou composts au niveau du pH et des ETM est mis en place. De plus, un fonds de garantie a été développé en 2006 afin de protéger les agriculteurs vis-à-vis des risques qui apparaîtraient dans les années à venir, après l'épandage des PRO, et provoqueraient une perte économique pour l'exploitant.

Les PRO peuvent quitter le statut de « déchets » pour intégrer celui de « produits » à travers une homologation ou une normalisation. Ils peuvent alors être commercialisés et utilisés par un public plus large, au même titre que n'importe quel engrais ou amendement.

L'homologation est délivrée sur dossier par le Ministère de l'Agriculture pour une période de dix ans.

La normalisation est possible si le produit répond à une norme AFNOR : la norme NF U 44-095 pour les composts obtenus à partir d'un mélange de boues résiduelles du traitement des eaux et de déchets verts ; ou la norme NF U 44-051 pour les composts issus de déchets verts, d'effluents d'élevage et de la fraction fermentescible des ordures

ménagères (BODET Cécile, 2013). Ces normes sont basées sur les mêmes règles que pour les déchets, mais sont plus strictes.

C'est l'utilisateur, l'agriculteur, qui est responsable de l'utilisation de ces produits homologués ou normalisés. Le suivi des parcelles n'est pas de mise, mais en Alsace, des documents doivent être fournis par le producteur et l'utilisateur au **SMRA68***, afin de tout de même garantir une traçabilité des produits.

I.3. Les objectifs et l'organisation de la recherche sur les PRO, en réseau et à Colmar

Pourquoi faire des essais ?

La plus grande partie des PRO, c'est-à-dire les effluents d'élevage, est utilisée depuis très longtemps en agriculture, et les capacités amendantes et fertilisantes de ces effluents paraissent incontestables. Mais peu d'études ont réellement chiffré leurs effets. De nouveaux PRO ne sont utilisés en agriculture que depuis peu, comme les digestats de méthanisation ; leur intérêt agronomique est peu démontré. Des questions se posent quant à la disponibilité des éléments fertilisants pour les cultures. Les expérimentations doivent permettre de mettre en évidence les avantages mais aussi les risques de surfertilisation, de pollution par ces éléments, ou encore d'émissions de gaz à effet de serre (GES), notamment N₂O et NH₃.

De plus, les PRO peuvent contenir des micropolluants et des microorganismes pathogènes, qui représentent un risque pour les cultures mais aussi l'environnement de façon plus large. Il est donc important de connaître les risques de contamination des différentes composantes concernées par l'épandage de PRO (eaux, sols, plantes) afin d'assurer l'innocuité de la pratique.

Enfin, de par leur statut de déchets, les PRO sont souvent perçus de façon négative. Il paraît important d'apporter des réponses scientifiques mais aussi pratiques, sur les effets à court et long termes des PRO, afin de faciliter l'acceptation dans la société, aussi bien chez les agriculteurs que chez le public non professionnel qui peut se trouver concerné (voisinage, promeneurs...). En effet, si la réglementation garantit l'absence de risque à court terme (SCHAUB Anne *et al*, 2007), on ne connaît pas encore de façon précise les effets à très long terme de ces PRO d'origines variées.

Il semblait ainsi nécessaire de mettre en place des expérimentations afin de déterminer la valeur agronomique de ces PRO et les effets sur la qualité du sol, des cultures et de l'eau.

De plus, il est intéressant de connaître l'effet des PRO les uns par rapport aux autres, leurs caractéristiques étant très variables en fonction de leur origine et de leur traitement (compostage, **chaulage***...).

Les réseaux

La problématique du retour au sol des produits résiduels organiques est donc ancienne et de nombreux essais ont été menés par des organismes de la recherche et du développement en France. Les essais sont très divers, depuis des essais sur l'azote sur 1 an jusqu'à des essais de plus de 10 ans sur les contaminants. Depuis la fin des années 2000 est apparue la nécessité de coordonner les études sur cette thématique (colloque de Colmar, 2007). L'INRA de Grignon a créé et anime deux réseaux complémentaires d'essais sur les

PRO (document 5): un réseau d'essais de recherche (SOERE PRO) et un réseau d'essais de recherche-développement (Réseau PRO). L'essai de Colmar appartient à ces deux réseaux.

Le SOERE PRO, Système d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement, labellisé depuis 2010 par l'Agence nationale de recherches pour l'environnement (Allenvi) (FORMISANO Sophie, 2013) est constitué de 3 essais principaux : QualiAgro à Feucherolles (78) démarré en 1998, Colmar démarré en 2000, et le Rheu (35) démarré en 2010. Deux autres essais où les épandages sont maintenant arrêtés (résultats recherchés obtenus/financements terminés) y sont associés : La Bouzule (54) et Couhins (33). Enfin, depuis 2013, deux sites en région tropicale se sont ajoutés : l'un à La Réunion et le dernier au Burkina-Faso. Ce sont des essais sur le très long terme, avec beaucoup de parcelles élémentaires, et très instrumentés.

Parallèlement au SOERE PRO, un réseau complémentaire d'expérimentations (Réseau PRO) regroupe depuis 2010 dans le cadre d'un projet **Casdar***, des essais moins conséquents mais permettant d'étoffer les données du SOERE PRO, à propos d'autres produits résiduaux et dans des conditions agropédologiques différentes. 307 essais ont été comptabilisés en France en 2013. Environ 40% des essais concernent des effluents d'élevages, 18% concernent des produits organiques d'origine animale et végétale (algues, farines d'os...), tandis que les PRO urbains et industriels représentent 26% des expérimentations (BELL Alix *et al*, 2013). Ces essais sont conduits par des organismes de recherche développement, comme les chambres d'agriculture, les instituts techniques, les lycées agricoles, l'ARAA, le SMRA68... Il s'agit souvent de parcelles chez les agriculteurs, parfois en stations expérimentales.

L'ARAA, l'INRA de Colmar et le **SMRA68*** collaborent depuis 1995 à la conception, au suivi et à l'analyse de 3 essais sur les PRO dans le Haut-Rhin, et font partie des 2 réseaux nationaux. Au niveau de l'essai de Colmar, l'ARAA participe à la conception de protocoles et à l'analyse de résultats dans le but de les transmettre aux conseillers agricoles ou aux agriculteurs.

L'essai de Colmar

L'essai de Colmar a été mis en place en 2000 afin d'étudier les impacts de l'épandage agricole de produits résiduaux organiques sur la qualité des sols, des eaux et des cultures. Il est situé sur le domaine de l'INRA de Colmar (document 6) et piloté par l'équipe du SEAV (Service d'expérimentation Agronomique et Viticole). C'est un essai à long terme qui vise à caractériser les impacts de 3 PRO différents (boue d'épuration urbaine, biodéchet et fumier de bovins) et leur compost. Afin de se rapprocher au plus des pratiques culturales régionales, l'essai est implanté sur une parcelle représentative de la région, et une rotation de 4 ans a été mise en place (maïs, blé d'hiver, betterave, orge de printemps). Un épandage de PRO est effectué tous les deux ans. Pour correspondre aux pratiques agricoles locales, la moitié des parcelles est également complétementée avec un engrais azoté minéral. Depuis 14 ans, les effets des PRO, agronomiques et contaminants, sont déterminés à travers des analyses de sol, des végétaux (récolte et résidus), et des eaux de percolation.

Ma mission : un bilan agronomique et économique après 12 ans d'expérimentation

La nécessité du bilan

Chaque année, un bilan de campagne est édité par les responsables du site. Un bilan correspond à une année, une culture, et présente les principaux résultats obtenus : les

caractéristiques physico-chimiques de l'horizon labouré, les rendements, les teneurs en éléments majeurs et en éléments traces des récoltes. Ils sont présentés lors de réunions internes ou de comités de pilotage en présence des financeurs et de professionnels intéressés par l'essai.

Mais depuis 14 ans, aucun bilan global n'a été rédigé à destination des agriculteurs ou d'autres publics.

L'ARAA a donc fait appel à un stagiaire pour traiter les données principales de 2000 à 2012, afin de comparer les effets agronomiques des PRO, mais aussi s'intéresser à l'aspect économique. En effet, l'épandage de PRO est souvent lié à la volonté de diminuer la quantité d'engrais épandue afin de réaliser des économies. Il paraît intéressant de comparer les systèmes par rapport à leur rentabilité économique. Le bilan des effets des PRO sur la contamination en éléments traces des différents compartiments sera étudié en 2015.

Le travail réalisé

Le bilan ne concerne donc pas toutes les données récoltées depuis 2001 : le stage s'intéresse à la valeur agronomique des PRO, définie à travers les rendements, les teneurs en éléments majeurs dans le sol et les cultures, et des indications économiques quant à la rentabilité des différentes conduites agricoles. Si l'analyse a concerné toutes les parcelles, le rapport s'intéresse à celles du sous-essai ayant été complété par une fertilisation minérale azotée. En effet, ce sous-essai se rapproche plus des pratiques agricoles.

Le but est de montrer, à long terme, l'intérêt d'un système par rapport à un autre, aussi bien agronomiquement qu'économiquement.

Les données des 12 années, disponibles sous forme de fichiers Excel, ont été traitées avec le logiciel Statbox par des analyses de variances, suivies de comparaisons de moyennes. Ces analyses permettent tout d'abord de savoir s'il existe une différence significative entre les 6 traitements, puis de classer ces derniers les uns par rapport aux autres.

Les résultats sont présentés graphiquement. Les représentations graphiques sont choisies de façon à mettre en évidence les différences (ou similitudes) observées entre les PRO, dans l'optique d'un document de communication à destination des agriculteurs.

Le bilan économique quant à lui est basé sur le coût estimé des différents épandages des PRO et des engrais minéraux (intrans et passage), et les rendements obtenus dans chaque cas de figure. On estime des différences de marges, qui peuvent alors être comparées selon les conduites.

Ce rapport présente donc les grandes tendances observées sur ces conduites avec 5 PRO différents sur 12 ans. Il permet également de se rendre compte si les méthodes utilisées pour estimer les quantités d'azote minéral à apporter en plus des PRO ont permis une bonne complémentation, aboutissant au bout des 12 ans à des rendements optimum. Le bilan économique permet de voir si ces rendements sont suffisants par rapport aux coûts des conduites.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. L'essai

Mise en place de la parcelle

L'expérimentation est située sur le domaine de l'INRA de Colmar. Elle recouvre une surface totale de 2,24ha, orientée sud-ouest. Elle est constituée de limons profonds caractéristiques de la région.

Le dispositif

Le dispositif, dont le plan est visible sur le document **7**, est partagé en deux sous-essais, eux-mêmes constitués de 4 blocs répétant 6 modalités. Il est mis en place selon un plan assimilable à un split-plot, de façon à faciliter les interventions culturales : chaque parcelle élémentaire mesure 10m de longueur sur 9m de largeur, soit 90m² de surface, permettant le passage d'outils agricoles classiques. De plus, les parcelles élémentaires sont séparées par des bandes tampons pour éviter les transferts de terre : des bandes cultivées (pour faciliter les interventions générales) et des bandes enherbées de 6m de largeur (*cf* plan).

Le facteur principal étudié est le type de PRO épandu. Il correspond à 6 modalités, dont les noms ont été définis selon une nomenclature commune pour tout le réseau :

- BOUE : boue urbaine déshydratée,
- DVB : même boue urbaine mais compostée.
- BIO : compost de biodéchet, c'est-à-dire la fraction fermentescible d'ordures ménagères, provenant d'une plate-forme de compostage
- FUM : fumier de vaches laitières, provenant d'une exploitation alsacienne.
- FUMC : même fumier mais composté
- TEM : témoin ne recevant pas de PRO

(Cette nomenclature sera utilisée dans la suite du rapport pour désigner les PRO ou les modalités correspondantes.)

Les PRO sont épandus tous les deux ans, pendant l'hiver. Si leur épandage est effectué manuellement sur les parcelles de l'essai, ce sont des PRO épandus à grande échelle chez les agriculteurs. Les doses d'apport sont calculées de façon à respecter la Directive Nitrate en application en plaine d'Alsace. En effet, celle-ci limite les apports d'azote organique à 170kg par hectare, les quantités de PRO apportées varient donc à chaque apport en fonction de leur nature et composition.

Un deuxième facteur est étudié : la complémentation minérale azotée.

Les parcelles du premier sous-essai (que l'on pourra nommer dans la suite du rapport « sous-essai 1 ») ne reçoivent pas de complémentation minérale. Il s'agit de comparer les PRO les uns par rapport aux autres sans interaction avec un autre facteur.

Les parcelles du deuxième sous-essai (sous-essai 2) sont complémentées par un engrais minéral azoté tous les ans, pour couvrir les besoins de la culture en prenant en compte l'azote supposé disponible provenant du PRO. Cette approche permet de s'apparenter au mieux aux pratiques agricoles, en mettant les cultures en conditions a priori optimales. C'est ce sous-essai qui nous intéresse dans le rapport.

Les cultures

Depuis 2000, une rotation de 4 ans a été mise en place sur toutes les parcelles. Jusqu'en 2012, 3 rotations se sont donc succédées sur l'expérimentation (document **8**), comprenant un maïs grain, un blé d'hiver, une betterave sucrière et une orge de printemps brassicole. Le choix de ces cultures a été fait dans le but d'avoir des modèles physiologiques variés, avec une racine, des grains, des cultures d'hiver et de printemps, et des cultures très présentes dans la région (à l'exception de l'orge brassicole de printemps, choisie elle de par l'intérêt d'un financeur). Les itinéraires techniques pratiqués sur les différentes cultures sont les itinéraires classiques suivis par les agriculteurs de la région.

Paramètres suivis et mesures réalisées

Sur les PRO

La composition des PRO peut varier légèrement selon les années. Elle varie en fonction de leur origine notamment (document **9**) qui a changé pendant les 12 ans selon les disponibilités et les stratégies (choix d'épandre le même biodéchet que sur l'expérimentation de l'INRA de Grignon par exemple). La composition des PRO peut aussi varier sur un même site de production en fonction de l'origine des déchets traités, des co-produits utilisés lors du compostage, ou de la conduite de l'élevage pour les fumiers.

Des analyses sont donc faites sur les PRO un mois avant épandage afin d'ajuster les doses d'épandage à 170 kg d'N organique/ha. Au moins 12 échantillons sont prélevés pour chaque PRO lors de la pesée à l'épandage, pour caractériser le PRO réellement épandu. Ces échantillons sont ensuite stockés au congélateur ou en chambre froide selon le type d'analyse à réaliser, et envoyés à analyser au Laboratoire d'Analyse des Sols (LAS) de l'INRA d'Arras et au LDAR* de Laon.

Sur les végétaux

A chaque récolte, des paramètres sont mesurés sur les parties récoltées et les résidus de récolte avant leur réincorporation. Ces paramètres sont détaillés dans le document **10**. Des variables sont calculées à partir de ces paramètres. Celles utilisées dans le rapport sont les suivantes :

Pour les céréales et le maïs

- rendement grain à 15% d'humidité en q/ha¹
- biomasse sèche des grains (parties récoltées) en T/ha
- biomasse sèche des résidus de récolte en T/ha
- concentrations en éléments majeurs dans les grains et les résidus de récolte.

Pour les betteraves

- rendement brut à 16% de sucre en T/ha
- biomasse sèche des betteraves en T/ha
- biomasse sèche des résidus de récolte en T/ha
- concentrations en éléments majeurs dans les betteraves et les résidus de récolte.

¹ Q/ha = quintaux/hectare (1quintal = 100kg)

Sur le sol

Les teneurs en éléments majeurs auxquels on s'intéresse sont analysées tous les deux ans. Pour cela, 10 échantillons élémentaires de terre sont prélevés avant chaque épandage de PRO au niveau de l'horizon de labour, soit une profondeur de 0 à 28 cm, pour constituer un échantillon composite par parcelle. Après séchage et tamisage à 2mm, une partie de chaque échantillon est envoyée à analyser au Laboratoire d'Analyse des Sols de l'INRA d'Arras (62), tandis que l'autre est conservée en échantillothèque pour d'éventuelles analyses ultérieures.

Les éléments analysés qui nous intéressent sont les suivants : carbone organique (Corg), azote total (N), potassium échangeable (K), phosphore total (P) et Olsen (P Olsen). Des caractères physico-chimiques tels que le pH et la CEC sont également mesurés.

L'essai fait également l'objet d'analyses concernant les autres éléments majeurs (magnésium, calcium, sodium), mais aussi les polluants tels que les ETM (éléments traces métalliques), les PCB (Polychlorobiphényles) ou les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), qui ne sont pas analysés dans cette étude.

II.2. L'analyse agronomique

L'analyse agronomique se déroule en 3 étapes :

- l'analyse des cumuls de rendements sur 12 ans,
- l'analyse de l'état du sol vis-à-vis des variations des teneurs en éléments majeurs entre 2000 et 2012,
- l'établissement de bilans tenant compte des flux d'éléments dans les systèmes générés par les variations d'apports de PRO et les exportations par les végétaux récoltés.

Pour les bilans azote et phosphore, c'est un « défaut de bilan » qui a été calculé puisqu'il a été possible de tenir compte de l'état du sol, des apports de PRO et des exportations par les végétaux, l'azote et le phosphore total ayant été mesurés pour tous ces paramètres ; le défaut de bilan étant calculé grâce à la formule suivante : Variation des stocks dans le sol (2012-2000) – Apports PRO – Apports minéraux + exportations par les récoltes. Ce défaut de bilan doit en théorie être proche de 0 si l'on a bien pris en compte tous les postes du bilan. Si ce n'est pas le cas, une entrée ou une sortie importante d'élément a été négligée.

Le bilan K se présente sous forme d'un bilan entrées-sorties ne tenant pas compte de l'état du sol. La formule utilisée est la suivante : Apports PRO + Apports Min – Exportations par les récoltes. Le K total n'a en effet pas été mesuré dans le sol (uniquement k échangeable).

Les fichiers de données initiaux et leur structuration

Tous les ans, les résultats des analyses présentées ci-dessus ont été mis en forme dans des fichiers Excel. Ils rassemblent pour chaque paramètre, les résultats des 48 parcelles, auxquelles sont associés des noms uniques. Les individus sont en lignes, tandis que les variables sont en colonnes. Ce sont ces fichiers qui ont été utilisés comme base pour l'analyse statistique.

De plus, des bilans de campagne ont été rédigés tous les ans par les deux responsables techniques qui se sont succédés sur l'essai. Certains sont utilisés pour l'interprétation des résultats sur 12 ans.

La plupart des fichiers a été remaniée de façon à pouvoir être utilisés par le logiciel Statbox. De plus, en 12 ans, le responsable de site a changé, et certaines méthodes d'analyses également. Cela explique des légers changements dans la mise en forme des fichiers. Il a donc fallu uniformiser les unités des données sur les 12 ans.

Les biomasses sont maintenues en T/ha. Elles sont mises en forme de façon à pouvoir calculer des moyennes sur les 12 ans, mais également par rotation et par culture.

Les teneurs en éléments dans le sol sont recalculées en g/kg pour homogénéiser les données de 2000 et 2012. Il s'agit également de standardiser les unités des éléments, notamment le phosphore dont on utilise les résultats en termes de P₂O₅ (oxyde) ou de P (élément) selon les cas.

La stratégie d'analyse

L'analyse des données s'est faite avec le logiciel Statbox (version 6). Il s'agit d'une analyse de variance (ANOVA) sur dispositif en split-plot, suivie de tests de comparaison de moyennes (des tests de Newman-Keuls au risque 5%). Le dispositif en split-plot a la particularité de permettre une analyse hiérarchisée en deux temps. Le premier facteur, définissant les sous-essais (facteur azote) est tout d'abord analysé seul. Le second facteur (effet PRO) et ses interactions avec le facteur azote sont ensuite analysés dans une seconde ANOVA, sur l'ensemble des deux sous-essais.

Ce sont donc les deux sous-essais qui sont analysés simultanément, même si ce n'est que le sous-essai 2 qui nous intéresse dans le rapport. En effet, Cette stratégie permet une plus forte puissance d'analyse de l'effet PRO que l'analyse séparée des deux sous-essais.

Le logiciel présente les résultats de l'ANOVA sous forme d'un tableau dans un fichier Excel (document **11a.**) : la partie 1 du tableau (cadre vert) correspond à l'analyse du facteur 1 (la complémentation en azote minéral), c'est-à-dire la comparaison des parcelles du sous-essai fertilisé, aux parcelles sous-essai non fertilisé. La deuxième partie du tableau (cadre orange) correspond à l'analyse du facteur 2 (les PRO) et son interaction avec le premier. Ce sont les p-value (encadrées en rouge) qui indiquent l'effet ou non d'un des facteurs. Une p-value inférieure à 5% (0.05) indique que l'hypothèse H₀ = absence d'effet du facteur, peut être rejetée.

Lorsqu'un effet est observé, l'ANOVA est suivie du test de Newman-Keuls. S'il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs, les effets des PRO sont les mêmes dans les deux sous-essais. Il n'y a alors qu'un seul test de Newman-Keuls effectué sur le facteur PRO (document **11b.**): les PRO regroupés sous la même lettre ne sont pas significativement différents.

S'il y a interaction entre les deux facteurs, les effets des traitements sont observés séparément (document **11c.**) On s'intéresse alors à la deuxième partie du tableau (avec N min., cadre bleu), qui concerne le sous-essai ayant reçu une fertilisation minérale.

Pour intégrer le témoin sans PRO et sans azote minéral du sous-essai 1, un deuxième tableau compare l'effet des PRO des deux sous-essais et permet donc de placer ce témoin en fonction des PRO du sous-essai 2.

La validation des analyses

L'ANOVA doit être validée par la vérification des résidus. Les résidus représentent les variations de données non expliquées par les facteurs, donc supposées aléatoires. Pour chaque analyse, on vérifie 3 conditions. La normalité des résidus est validée par un histogramme de répartition des résidus, par des indices de normalité et par l'absence de résidus suspects. Ensuite l'indépendance des résidus est vérifiée par une cartographie : elle valide la répartition aléatoire des « erreurs » sur la parcelle. Enfin, pour que la comparaison de moyennes soit possible, il faut que les variances des résidus ne soient pas différentes par modalités. Un test de Bartlett teste cette hypothèse d'égalité.

Le problème le plus fréquemment observé est la présence d'un résidu suspect, et donc d'une donnée suspecte. Celle-ci est corrigée à l'aide d'une estimation de Yates effectuée par le logiciel, ou conservée si elle est cohérente agronomiquement.

La représentation graphique des résultats

Les résultats des analyses statistiques sont présentés graphiquement. Les graphiques reprennent les données utilisées pour l'analyse, et intègrent les résultats à travers les lettres différenciant les groupes homogènes au test de Newman-Keuls. La modalité TEM N, ayant reçu uniquement de l'azote minéral, constitue un premier témoin « positif » auquel on compare les 5 modalités PRO. La modalité TEM sans N constitue un deuxième témoin « négatif » qui permet de comparer la conduite uniquement minérale à une conduite sans apport. Lorsque le témoin avec N se différencie, cela est noté sur le graphique avec une étoile (*). Si les deux témoins ne sont pas significativement différents, la barre du graphique est surmontée d'un signe égal : (=).

Pour le sol, ce sont les teneurs en 2012 qui sont représentées en pourcentage des teneurs en 2000. L'état du sol en 2000 correspond à l'état initial du sol, puisque les analyses statistiques ne montrent pas de différences entre les parcelles cette année-là. Les résultats de l'analyse statistique sont également représentés sur les graphiques à travers les lettres issues du test de Newman-Keuls.

Enfin, l'analyse économique est présentée à travers des tableaux récapitulatifs.

II.3. L'analyse économique

Il s'agit de réaliser un bilan permettant de mettre en évidence la différence de marge entre les différentes conduites expérimentées, en prenant en compte les produits (donc les rendements obtenus) et les différences de charges opérationnelles liées aux modalités. Le bilan est un bilan global, effectué sur les 12 ans, afin d'estimer la rentabilité des systèmes sur une durée moyenne. On s'intéresse ici aux PRO urbains, les boues, les boues compostées et le biodéchet ; toujours lorsqu'ils sont complétés avec un engrais minéral azoté. En effet, les fumiers sont des PRO un peu à part puisqu'il est difficile de leur donner un prix : ils sont souvent échangés contre de la paille. Or sur l'essai de Colmar, les pailles sont réincorporées.

Le bilan se présente sous forme d'un tableau comprenant d'une part les « charges », et d'autre part les « produits ». La différence entre les deux est la différence de marge entre les conduites, qui permet de visualiser les systèmes les plus rentables.

Les charges correspondent au coût des engrais et des PRO, ainsi que le coût de leur épandage. Le prix des engrais correspond à un prix moyen calculé par la Chambre d'Agriculture de la Région Alsace à partir de prix recueillis auprès des agriculteurs pour la campagne 2013. Le prix des PRO a été défini après consultation du SMRA68. Ces prix varient énormément selon les régions et les producteurs de PRO, ceux utilisés correspondent donc à une tendance régionale. Enfin, les coûts des épandages ont été définis à partir du barème d'entraide 2013 de la Chambre d'Agriculture de l'Indre, qui prend en compte les charges de mécanisation (fioul, amortissement...) et de main d'œuvre.

Les « produits » correspondent aux cumuls des rendements de chaque culture, multipliés par le prix de ces cultures, sur la base du « barème d'indemnisation pour dégâts causés aux cultures et aux sols » de 2014 de la Chambre d'Agriculture d'Alsace, définis à partir des prix de vente de 2013.

Les différences de marge reflètent donc les rendements moyens obtenus sur les 12 ans, mais dans un contexte de prix (de vente comme des intrants) de l'année 2013.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés sont ceux des analyses faites à partir des données du sous-essai ayant reçu une complémentation minérale, afin de correspondre au mieux aux pratiques agricoles de la région. La modalité n'ayant reçu aucune fertilisation, ni minérale ni organique, est également prise en compte dans les résultats afin de constituer un « témoin négatif ». Les premières variables analysées sont les rendements obtenus depuis 12 ans. On s'intéresse ensuite à l'état du sol après ces 6 épandages, puis aux bilans de 3 éléments principaux (N, P, K) dans les systèmes. Enfin, le bilan économique permet d'estimer la rentabilité des conduites avec des PRO urbains testés sur l'essai.

Les codes lettres et symboles utilisés sur les graphiques sont détaillés dans la partie « Représentation graphique des résultats » des Matériels & Méthodes (II.2). Tous les documents présentés dans cette partie sont des documents personnels.

III. 1. Résultats agronomiques

Rendement obtenus après 12 ans d'épandages

Résultats

Les premières données à avoir été analysées sont les rendements cumulés sur les 12 ans en termes de biomasse récoltée (exportée hors de la parcelle). Ce sont les biomasses en tonne de matière sèche / hectare qui sont analysées afin de pouvoir additionner les différentes cultures : maïs, céréales, betterave. Les rendements sont un indicateur particulièrement important et représentatif pour les agriculteurs, puisque c'est à partir du rendement que sont calculées les marges économiques.

Le document **12** présente le cumul de biomasse sur les 12 ans. Les 5 PRO ne semblent pas se différencier. Le témoin avec azote minéral se situe au même niveau que les modalités PRO, tandis que le témoin sans azote minéral ni PRO chute dès les premières années. L'analyse statistique confirme ce que l'on voit : le document **13** présente graphiquement les résultats de l'analyse. Sur les 12 ans, les biomasses obtenues avec les différents PRO ne sont pas significativement différentes. Le témoin azoté semble légèrement en dessous mais pas de façon significative. Le témoin sans azote par contre a énormément chuté.

La complémentation minérale sur PRO a donc bien été réalisée. Au bout de 12 ans, l'apport de PRO en complémentation avec de l'azote minéral a permis de maintenir de bons rendements pour tous les PRO étudiés, équivalents au moins à une conduite minérale classique.

Il est cependant possible qu'une différenciation des PRO se fasse sur les cultures. L'analyse est donc réalisée de la même façon pour chaque culture, à partir des cumuls des rendements par culture.

On observe au niveau du maïs les mêmes résultats qu'au niveau des 12 ans (données non présentées) : tous les PRO, complémentés avec de l'azote minéral, ont permis d'obtenir des rendements en maïs équivalents à ceux obtenus par la conduite minérale uniquement (en moyenne 39, TMS/ha, p-value = 0,0006)

Sur la betterave (document **14**), les effets des PRO semblent plus significatifs. En effet, les résultats de l'analyse statistique différencient certaines modalités PRO : BOUE, DVB et FUM semblent permettre d'obtenir de meilleurs rendements que BIO et FUMC. De plus,

avec PRO et complémentation minérale, les rendements ont été meilleurs que dans le cas de la conduite uniquement minérale. Les rendements de cette dernière ne sont d'ailleurs pas significativement différents de ceux du témoin sans azote.

Comme le montre le document **15**, les PRO n'ont pas permis, après 3 cultures de blé, d'obtenir des rendements équivalents au témoin ayant reçu uniquement une fertilisation minérale. FUMC est par contre significativement meilleur que les 4 autres PRO. Le témoin sans azote est lui de nouveau bien en dessous des autres modalités.

Contrairement au blé, les rendements obtenus en orge (document **16**) ont été meilleurs avec apport de PRO que dans le cas du système minéral : tous les rendements avec PRO sont significativement meilleurs que ceux du témoin. L'orge semble donc mieux profiter de l'arrière-effet des PRO que le blé qui est la culture ayant donné de moins bons résultats sur cette rotation.

L'analyse des biomasses a également été faite en fonction des rotations. Mais les PRO ne se différenciant pas au bout de 12 ans, on n'observe pas non plus de différences significatives entre les traitements à chaque rotation sur ce sous-essai. Cependant, cela permet de voir que les parcelles du sous-essai non complétement en azote minéral donnent de moins bons rendements que le sous-essai 2 dès la première rotation.

Discussion

Les résultats obtenus au bout des 12 ans sur ce sous-essai fertilisé sont ceux que l'on attendait. En effet, la complémentation en azote minéral devait permettre d'obtenir des rendements aussi bons avec la conduite PRO et minérale, qu'avec la conduite minérale uniquement, tout en permettant de diminuer la quantité d'azote minéral apportée sur les parcelles PRO. La complémentation a donc bien été conduite.

Mais des différences sont observées au niveau des cultures. Le maïs et la betterave avec PRO ont donné des rendements aussi bons, voire meilleurs dans le cas de la betterave, que les deux témoins sans PRO. Les rendements en maïs ont d'ailleurs été équivalents aux rendements moyens de la région pendant les 4 années de culture. Cependant, ce sont ces deux cultures qui ont profité de l'effet direct des PRO, contrairement aux céréales qui sont implantées en année avec fertilisation minérale uniquement et ne bénéficient que de l'arrière-effet PRO.

Le blé a reçu un complément de fertilisation minérale azotée en tenant compte de l'arrière-effet des PRO, et il semble que l'effet PRO ait été surestimé dans le calcul de la complémentation azotée minérale.

L'orge brassicole n'est pas une culture pour laquelle on recherche un rendement particulièrement important, mais un bon rendement avec un taux de protéine optimum, ni trop bas, ni trop élevé. Dans le cas de l'orge, il semble que l'arrière-effet des PRO ait été sous-estimé puisque les modalités PRO dépassent le témoin, qui lui a été légèrement sous-fertilisé puisque ce n'était pas un rendement élevé qui était recherché.

Enfin, il ne faut également pas oublier que les rendements de betteraves ne concernent que deux années de récolte. Le nombre de répétition étant moins important, les résultats sont à considérer avec plus de précaution.

Ces premières analyses permettent de voir que l'épandage de PRO, avec une complémentation minérale, a permis d'obtenir sur cette période des rendements aussi bons que dans le cas d'une fertilisation uniquement minérale. La complémentation minérale

adaptée à chaque traitement PRO a donc été bien calculée selon la méthode des bilans. Il semble ainsi que l'apport des PRO étudiés, aussi bien d'origine urbaine qu'agricole, puisse se substituer à une partie de la fertilisation minérale, sans que les rendements globaux sur une telle rotation ne soient affectés.

Le blé cependant, bien que recevant une fertilisation minérale mais ne bénéficiant pas de l'effet direct des PRO, a montré de moins bons résultats pour les modalités PRO, par surestimation de l'arrière effet PRO, à l'inverse de l'orge. Il semblerait intéressant de revoir les coefficients de disponibilité de l'azote des PRO utilisés en arrière-effet pour faire les calculs de complémentation azotée minérale.

Mais les rendements ne sont qu'un indicateur quantitatif des effets des PRO. Le suivi de l'état du sol est une notion importante permettant de rendre compte de l'effet amendant des PRO à long terme.

Etat du sol après 12 ans d'épandages

L'état du sol est évalué à partir des teneurs du sol en éléments majeurs (C organique, N, P, K) du pH et de la CEC. Il s'agit d'une comparaison entre l'état initial du sol et son état 12 ans après, en 2012. Excepté dans le cas du pH, les graphiques représentent donc les teneurs mesurées en 2012 en pourcentage des teneurs initiales, c'est-à-dire de 2000. En effet, en 2000, avant apports, aucune différence significative n'a été trouvée entre les parcelles pour les paramètres étudiés. Cependant, l'ANOVA a elle été faite sur les teneurs en 2012, les lettres classent donc les modalités en fonction des teneurs dans le sol en 2012 mais étant donné qu'il n'y avait pas de différence significative en 2000, les résultats de l'ANOVA peuvent être appliqués aux deux variables.

Le carbone organique

Les variations de teneurs en carbone dans le sol sont présentées dans le document **17**. Tout d'abord, les deux témoins ne sont pas significativement différents. Dans les deux cas, la teneur en carbone dans le sol a diminué de presque 10% en 12 ans. Dans le cas de la BOUE également, la teneur en carbone a diminué, mais pas de façon significative par rapport aux autres PRO tels que les deux fumiers. Seule la teneur dans les sols de la modalité BIO est significativement supérieure aux autres modalités. Excepté la BOUE, l'épandage de PRO a permis de maintenir les teneurs en carbone dans le sol de façon plus ou moins significative par rapport au témoin.

La baisse de la teneur en carbone organique dans le sol de la parcelle ne recevant que de l'azote minéral illustre bien la tendance observée dans les sols céréaliers en général, particulièrement en Alsace : une baisse des teneurs en C org. dans le sol, même si les entrées de carbone par les résidus de culture sont élevés, notamment avec le maïs grain à haut rendement.

Les légères variations entre les PRO peuvent s'expliquer par la teneur en carbone organique des PRO, qui est légèrement supérieure dans la boue compostée (DVB) et le biodéchet (BIO) ; mais également la stabilité des matières organiques apportées. Cependant, les teneurs en carbone assez élevées après 12 ans s'expliquent également par la conduite particulière de l'essai. En effet, les résidus de récolte incorporés tous les ans représentent un apport en carbone important, plus important que la part apportée par les PRO. Le choix de cette conduite écarte légèrement l'essai des pratiques agricoles classiques,

puisque les agriculteurs qui épandent des PRO (en particulier des fumiers) sont généralement ceux qui doivent exporter les pailles, voire le maïs ensilage. Ce double apport de carbone a donc permis de maintenir de bonnes teneurs en carbone dans le sol, qui ne seraient sûrement pas les mêmes si les résidus avaient été exportés.

Mais il n'y a pas de différence entre les deux témoins, alors que les parcelles fertilisées uniquement avec du minéral produisent plus de résidus de récolte. Le carbone organique apporté par les PRO n'est donc pas négligeable, les deux PRO urbains BIO et DVB permettant de maintenir des teneurs en carbone dans les sols. Plus que la quantité de matière organique qui entre dans le sol, c'est sa qualité (composition) qui va permettre ou non de maintenir le taux de carbone du sol, les résidus de culture n'ayant pas le même effet que les PRO, dont l'effet varie également selon leur composition.

L'azote

Les teneurs en azote total dans les sols des différentes parcelles sont représentées de la même façon que pour le carbone, dans le document **18**.

Entre 2000 et 2012, les teneurs en azote total ont diminué pour toutes les modalités. De même que pour le carbone, les deux témoins ne sont pas significativement différents mais significativement inférieurs aux autres modalités. Apporter uniquement de l'azote minéral n'a pas permis à long terme de maintenir les teneurs en azote total dans le sol, qui ont chuté autant que dans la conduite sans aucune fertilisation.

Les teneurs dans les parcelles DVB, BIO et FUM sont significativement supérieures aux autres modalités, BOUE et FUMC.

L'épandage de certains PRO a ainsi permis de limiter la diminution de la teneur en azote total dans le sol et donc maintenir la disponibilité en azote des sols. De même que pour le carbone organique, les deux PRO urbains, DVB et BIO montrent de bons résultats.

Mais si l'azote est un élément important pour la nutrition des plantes, le phosphore et le potassium le sont également et il est possible que les PRO se distinguent différemment pour ces éléments là.

Le potassium

Les teneurs en potassium ont été analysées en termes de K_2O échangeable, c'est-à-dire cette fois les quantités d'élément directement assimilables par les plantes.

Les quantités de potassium échangeable dans le sol ont diminué dans tous les cas (document **19**) sauf pour les deux modalités « fumier ». En effet, les teneurs en K_2O échangeable ont augmenté dans ces deux parcelles, le FUM étant significativement supérieur au FUMC.

Les autres PRO se trouvent bien en-dessous, avec des baisses de teneurs de 30 à 40% par rapport à l'état initial, tout en restant cependant au-dessus de la conduite minérale, sauf pour BOUE qui n'est pas significativement différent du témoin azoté.

Les modalités témoins ont également vu leur teneur en potassium diminuer, mais de façon plus importante pour le témoin recevant de l'azote minéral.

Les résultats obtenus sont cohérents. En effet, les fumiers sont des PRO comprenant une forte part de potassium. L'apport de ces PRO sur une parcelle permet donc à long terme de maintenir et même d'augmenter la teneur en potassium dans le sol.

Les autres PRO, moins riches en potassium, n'ont pas cet effet là, et au bout de 12 ans, les quantités disponibles dans le sol diminuent fortement. On constate néanmoins que l'apport

de DVB et BIO a limité quelque peu les pertes par rapport à une fertilisation minérale. Si les PRO se différencient peu au niveau des rendements, leur effet amendant varie et les résultats de l'essai montrent qu'un apport supplémentaire de potassium serait nécessaire en plus de l'épandage de BOUE, DVB ou BIO, lorsque cet épandage est fait sur la base de 170 kg d'azote organique/ha.

Enfin, la différence observée entre les deux témoins peut s'expliquer par une exportation de potassium plus importante dans le cas du témoin azoté, à travers les rendements plus importants.

Le phosphore

L'analyse du phosphore dans le sol a été faite sur les teneurs en phosphore total et en phosphore Olsen, ou échangeable (disponible pour les cultures). Les données étaient en effet disponibles dans les deux cas en 2000 et 2012 et les résultats obtenus différents.

Les résultats du phosphore total sont présentés dans le document **20a**. Les teneurs dans les parcelles ayant reçu un apport de PRO n'ont pas diminué au bout de 12 ans, mais plutôt légèrement augmenté. Seules les teneurs pour les deux témoins ont légèrement diminué. Tous les PRO sont donc significativement supérieurs au témoin azoté. DVB est significativement supérieur à BOUE, qui est significativement supérieur aux 3 autres PRO.

Si les teneurs en phosphore total ont augmenté dans les parcelles ayant reçu un apport de PRO, les teneurs en P_2O_5 Olsen ont diminué dans tous les cas sauf DVB (document **20b**). DVB est, avec la BOUE, significativement supérieur aux autres PRO.

Les deux témoins ont également les teneurs les plus faibles, significativement différents des modalités avec PRO.

Les différences observées entre les PRO sont cohérentes : les boues (BOUE et DVB) sont des PRO riches en phosphore. Ils ont permis d'augmenter la teneur en P_2O_5 Total dans les parcelles mais également en P_2O_5 Olsen.

Au contraire, les autres PRO ont des teneurs plus faibles en phosphore. Leur apport au bout de 12 ans a donc permis de maintenir les teneurs totales dans les sols mais pas le phosphore disponible de façon réellement significative.

De la même façon que pour le potassium, des différences apparaissent entre les PRO, de part leur composition notamment. Si ces différences de composition étaient connues à la mise en place de l'essai, le choix d'une complémentarité minérale uniquement azotée a permis de discriminer les ces 5 PRO précisément, notamment entre les PRO compostés et non-compostés, qui se différencient parfois significativement, et d'autres non (FUM et FUMC ne sont pas significativement différents vis-à-vis du phosphore total et Olsen).

Le pH

Le pH a peu varié entre 2000 et 2012. Le graphique (document **21**) ne présente que le pH en 2012. En effet, le pH est une caractéristique du sol qui peut beaucoup varier au cours de l'année, en fonction de l'activité des microorganismes par exemple. Il n'est donc pas cohérent de comparer les pH de 2012 à l'état initial par un pourcentage. On compare ainsi seulement l'état final de chaque PRO par rapport aux autres PRO, en sachant qu'en 2000, il n'y avait pas de différences significatives de pH entre les parcelles (pH moyen de 8,25).

Les deux témoins sont supérieurs aux autres modalités, mais pas de façon significative par rapport au FUMC. Il semble donc que la présence de PRO, sauf le FUMC, ait un effet légèrement acidifiant dans ce type de sol alcalin.

Mais si l'analyse statistique voit des différences significatives entre certaines modalités, celles-ci sont relativement faibles. On ne peut donc pas vraiment différencier les PRO de l'essai par rapport à cette caractéristique, du moins sur les 12 années étudiées.

La CEC

De même que le pH, la **CEC*** n'a pas beaucoup évolué entre 2000 et 2012. Le document **22** présente les résultats concernant la CEC, de la même façon que les premiers éléments étudiés, la CEC en 2012 en pourcentage de l'état initial. Si tous les PRO sont légèrement supérieurs au témoin, seul DVD a permis d'augmenter la CEC dans les parcelles. BIO, FUM, FUMC et BOUE ne sont pas significativement différents.

Si les différences entre modalités ne sont pas très importantes, DVB et BIO sont supérieurs et cela peut s'expliquer par le fait que ce sont les PRO qui ont un effet sur la teneur en carbone organique du sol plus important.

Sur une rotation telle que celle mise en place sur l'essai, l'apport de PRO permet seulement de légèrement atténuer la baisse de la CEC.

Les rendements et l'état du sol permettent déjà de discriminer les PRO et faire une critique des différentes conduites sur la rotation mise en place à Colmar depuis 12 ans. Mais ils ne prennent pas en compte les flux d'éléments dans les systèmes. Les bilans qui suivent permettent de différencier les PRO en tenant compte des entrées et des sorties d'éléments dans les systèmes.

Les bilans N, P et K

L'analyse des teneurs dans le sol ne peuvent donc être totalement interprétées sans tenir compte des flux d'éléments dans les systèmes générés par les apports de PRO et d'engrais, les exportations par les végétaux récoltés. Ces bilans sont une approche théorique des flux d'éléments dans les parcelles, pour tenter d'évaluer les pertes et entrées de ces éléments dans les systèmes, qui n'ont pas été mesurés dans le suivi de l'essai.

Rappelons que pour les bilans de l'azote et du phosphore, il s'agit du calcul d'un « défaut de bilan » puisqu'il a été possible de tenir compte de la variation de l'état du sol entre 2000 et 2012, des apports de PRO et des exportations par les végétaux (l'azote et le phosphore total ayant été mesurés pour tous ces paramètres). Le défaut de bilan est proche de 0 lorsque tous les postes importants ont bien été pris en compte. Sinon c'est une entrée ou une sortie d'élément non négligeable qui n'a pas été mesurée. Le bilan K lui, se présente sous forme d'un bilan entrées-sorties ne tenant pas compte des variations des teneurs en éléments dans le sol entre 2000 et 2012, puisque les teneurs en K total n'ont pas été mesurées dans le sol en 2000.

Le défaut de bilan de l'azote

Le graphique (document **23a.**) présente donc les variations des quantités d'azote dans le sol que l'on n'explique pas par les apports et les exportations connues et mesurées. Les variations d'azote étant négatives, il y a eu des pertes dans les systèmes sur ces 12 ans, sans doute par lessivage de nitrate et par volatilisation (NH_4 , N_2O ...). Tout d'abord, les pertes dans le cas des modalités recevant des PRO sont beaucoup plus importantes que le témoin n'ayant reçu aucune fertilisation. Cela est tout à fait cohérent puisque les parcelles avec PRO ont reçu de l'azote sous forme organique et minérale. Le témoin azoté lui a généré deux fois plus de pertes d'azote total que les autres modalités, qui ne sont pas significativement différentes. Mais il faut noter qu'en 2003, une erreur expérimentale de fertilisation a été faite : les quantités d'azote minéral apporté ont été multipliées par 10. Cette erreur a été d'autant plus importante sur le témoin azote, ce qui explique en partie des pertes cette année là, et donc sur les 12 ans.

Ainsi, si sur chaque parcelle de l'azote a été apporté selon les besoin des plantes, l'apport par les PRO permet de limiter les pertes d'azote total. Le témoin azoté a reçu beaucoup d'azote afin d'obtenir de bons rendements, mais les pertes ont été très importantes. Ce témoin montre bien d'ailleurs qu'une surfertilisation n'entraîne que l'augmentation des pertes d'azote par lessivage/volatilisation.

Le tableau (document **23b.**) permet de situer les quantités perdues par rapport aux apports et exportations connus, utilisés pour faire le bilan. Ces quantités sont relativement importantes, puisqu'elles correspondent à presque la moitié des apports d'azote effectués sur les parcelles.

Si l'azote est un élément facilement lessivable pour lequel il est difficile d'éviter les pertes, l'épandage de PRO semble permettre de limiter ces dernières.

Le défaut de bilan du phosphore

Le bilan du phosphore est très différent de celui de l'azote, mais l'ANOVA n'a pas montré de différences significatives sur les données (document **24a.**). Si dans tous les cas il semble que la quantité de phosphore ait augmenté dans l'horizon étudié, par une entrée de

phosphore qu'on ne connaît pas, le test ne peut pas dire s'il y a des différences significatives ou non entre les modalités.

Il semble donc qu'il y a eu des entrées de phosphore autres que l'apport par les PRO et le faible apport minéral en 2007 sur les betteraves. Elles sont relativement faibles dans le cas de la BOUE, du FUMC et du témoin azoté, par rapport à l'apport total sur les 12 ans (document **24b**). Cette entrée pourrait correspondre à une remontée de phosphore des horizons inférieurs par les racines et qui est maintenue dans l'horizon de surface lors de la réincorporation des résidus.

On remarque également que, si les exportations par les récoltes sont du même ordre de grandeur pour chaque modalité (excepté le témoin sans fertilisation), les variations de stocks dans le sol sont très différentes. Comme on l'avait remarqué dans la partie II, « Etat du sol après 12 ans d'épandages », le témoin azoté est la seule modalité pour laquelle il y a eu une diminution des teneurs en phosphore du sol, alors que le bilan observe également une entrée de phosphore dans le système.

Ces résultats devraient être approfondis par une analyse plus poussée des flux de phosphore dans les parcelles à encore plus long terme.

Le bilan « entrées-sorties » du potassium

Le bilan du potassium n'a pas pu être réalisé de la même façon que les deux précédents, il s'agit donc d'un simple bilan « entrées – sorties ». Dans le cas où le bilan est positif, il y a eu plus d'apport de potassium que d'exportation par les résidus de récolte, et inversement.

L'analyse montre que les modalités sont toutes significativement différentes. Le bilan est positif pour les PRO suivants : FUM>FUMC>BIO>DVB. Dans ces cas là, épandre des PRO sur la base de 170kg d'azote organique/ha a donc permis d'apporter suffisamment de potassium par rapport aux exportations de cet élément par les résidus de récolte.

Dans le cas de la BOUE, ajuster les apports de PRO par rapport à l'azote n'a pas permis d'équilibrer le bilan du potassium.

Enfin, le témoin azoté est moins bon que la BOUE : il y a également plus d'exportation que d'apport de potassium dans ce système.

Ce type de bilan ne permet pas d'apporter plus de précision que les variations de teneurs en potassium dans le sol entre 2000 et 2012, même s'il s'agit d'une approche différente. Il eu donc été intéressant de mesurer le potassium total dans le sol au début de l'essai.

Conclusion agronomique

S'ils ne se sont pas différenciés au bout de 12 ans vis-à-vis des rendements, l'effet amendant varie selon les PRO. Sur ce sous-essai complétement en azote minéral, peu de différences ont été observées vis-à-vis du pH, de la CEC et des teneurs en azote total dans le sol. Les résultats du pH et de la CEC sont donc bons mais pourraient être observés à plus long terme. Ceux de l'azote sont ceux attendus, puisque la fertilisation des cultures est menée de façon à optimiser les flux d'azote dans les systèmes.

Certains PRO n'ont cependant pas permis de maintenir de bonnes teneurs en potassium (les boues et le biodéchet) et en phosphore disponible (le biodéchet et les fumiers), et cela s'explique principalement par les teneurs des PRO au niveau de ces éléments là.

Ainsi, si l'apport de PRO, couplé à une fertilisation minérale azotée raisonnée, est bénéfique en permettant de maintenir de bons rendements à long terme, il faudrait pour certains compléter la fertilisation, au niveau des autres éléments importants pour les systèmes sol-plante que sont le phosphore et le potassium. Cette complémentarité pourrait être imaginée minérale, mais la caractérisation des PRO met en avant une certaine complémentarité entre les PRO plutôt d'origine urbaines et ceux d'origine agricole, qui pourrait être utilisée pour valoriser l'épandage des PRO en limitant les apports de phosphore et potassium minéral.

L'établissement des bilans agronomiques a permis d'évaluer les pertes d'éléments non mesurés dans les systèmes. Il semble difficile d'en faire un indicateur simple de la qualité agronomique des PRO, puisque leur interprétation mériterait d'être approfondie, et il n'a pas été possible de réaliser ces bilans pour tous les éléments majeurs.

Les résultats économiques présentés dans la partie suivante ont permis de caractériser les PRO sous un aspect s'éloignant de l'agronomie mais parfois aussi parlant pour les agriculteurs, et qui n'avait jusque là pas du tout été abordé sur l'essai.

III.2. Les résultats économiques

Les bilans économiques ont été établis pour les 3 PRO d'origine urbaines, dont le coût moyen est plus facile à estimer que les fumiers : concernant les modalités fumiers, la conduite de l'essai s'éloigne de la réalité agricole de par la réincorporant les pailles malgré l'apport de fumiers.

Chaque bilan correspond à une différence de marge entre la conduite avec PRO et la conduite minérale. Il est à noter que pour ces bilans économiques, les erreurs expérimentales d'apports d'azote minéral ont été corrigées, c'est à dire remplacées par la quantité qui aurait du normalement être apportée.

Le tableau **a** du document **26**, synthétise le bilan de la conduite BOUE. La marge obtenue sur 12 ans est légèrement supérieure à celle de la conduite minérale, ce qui correspond sur 1 an à une différence de marge de +98€. Cela s'explique par des charges de fertilisation moindres : on apporte moins d'azote minéral, et la BOUE dans le Haut-Rhin, est un PRO gratuit dont l'épandage est rarement à la charge de l'agriculteur. Des rendements sur 12 ans légèrement supérieurs dans le cas de la conduite avec BOUE accentuent la différence de marge.

Le bilan de la conduite avec DVB (document **26b.**) est légèrement meilleur : la différence de marge avec la conduite minérale est de +111€. En effet, si le DVB est un PRO généralement payant étant donné que c'est un produit composté, augmentant les charges de fertilisation, les rendements obtenus sur 12 ans ont été supérieurs à ceux de la conduite minérale, et également de la conduite BOUE. Ici la différence de marge est donc principalement due aux produits.

Enfin, le BIO (document **26c.**) est le PRO ayant la différence de marge la plus faible (+26€). C'est également un produit composté, donc souvent payant et, si les cas varient beaucoup selon l'organisme producteur, nous avons considéré ici que l'épandage était à la charge de l'agriculteur. Les charges de fertilisation sont donc plus élevées que celles de la conduite minérale, tandis que les rendements sont meilleurs.

Ainsi, ces trois PRO urbains, par rapport au coût de la fertilisation, ont permis des marges supérieures que celle obtenue par la conduite minérale. Si la différence de marge varie selon les PRO, elle reste importante à l'hectare, au regard des marges régionales de ces cultures. En effet, en 2013 en Alsace, la marge brute du blé était de 711€/ha, celle du maïs de 676€/ha (mauvaise année), et celle de la betterave de 1566€/ha (Chambre d'agriculture de la région Alsace, 2013). Les données pour l'orge de printemps ne sont pas connues car c'est une culture assez rare en Alsace.

Ces marges brutes ne prennent pas en compte, contrairement à celles calculées ici, les charges de mécanisation et de main d'œuvre mais permettent de donner un ordre de grandeur : les différences de marges obtenues sur les parcelles BOUE et DVB correspondent à plus de 10% des marges brutes du blé et du maïs.

IV. CONCLUSION

L'analyse des données du dispositif de Colmar s'est faite d'un point de vue agronomique, par l'étude statistique des données agronomiques recueillies sur l'essai, mais également économique, à travers les rendements obtenus et des données économiques régionales. L'analyse a ainsi permis de discriminer 5 PRO : une boue de station d'épuration, cette même boue compostée, un biodéchet, un fumier, et ce même fumier composté. Il s'agissait ainsi de réaliser un bilan des observations faites depuis plus de 12 ans sur l'essai.

Les rendements obtenus sur les 12 ans ont permis de comparer les PRO sur un aspect « quantitatif ». Leurs caractéristiques amendantes ont été étudiées à travers la comparaison des teneurs en éléments majeurs dans les sols après 12 années, par rapport à l'état initial. Des bilans agronomiques ont permis d'évaluer l'importance des entrées ou des sorties d'éléments majeurs dans les systèmes, que les analyses sur l'essai n'ont pas mesuré. Enfin, l'aspect économique a été abordé – pour la première fois sur l'essai – à travers le calcul de différence de marge entre les conduites avec PRO d'origine urbaine et la conduite avec fertilisation minérale azotée uniquement.

L'épandage de PRO a permis d'obtenir des rendements aussi bons qu'une conduite uniquement minérale, en particulier grâce à une complémentation minérale azotée bien maîtrisée, sauf sur le blé en arrière-effet. Cependant, cela n'a pas permis de maintenir les teneurs en azote total dans le sol. Bien que les pertes par lessivage ou volatilisation soient beaucoup moins importantes lorsque l'azote est en partie apporté sous forme organique, elles restent non négligeables même lorsque des PRO sont épandus.

Si les PRO urbains ont permis de maintenir une bonne teneur en phosphore, les fumiers eux permettent à long terme d'augmenter les teneurs en potassium dans le sol. Une entrée non mesurée de phosphore dans les systèmes a par ailleurs été mise en évidence. Les PRO étudiés ont également permis de maintenir le carbone organique, le pH et la CEC proches de leur état initial.

Enfin, les PRO urbains ont permis d'obtenir une marge économique théorique supérieure à celle de la conduite minérale.

Au bout de 3 rotations, l'épandage de PRO ne semble n'avoir été préjudiciable que pour le rendement du blé à cause d'une mauvaise estimation de l'arrière effet azoté des PRO. Une complémentation phosphatée et/ou potassique semble nécessaire pour certains PRO afin de maintenir les teneurs assimilables dans le sol.

Ces observations devraient permettre de réorganiser la fertilisation de façon à maintenir de bonnes teneurs en phosphore et azote dans le sol, tout en limitant les apports minéraux de phosphore et de potassium.

Cependant, tous les éléments du sol n'ont pas pu être traités dans cette analyse, à laquelle il faudra donc coupler une analyse des éléments traces dans le sol et des polluants, qui se fera sur le site de Colmar pendant l'année 2015.

Suite aux constatations faites depuis quelques années vis-à-vis du phosphore et du potassium, l'essai de Colmar est en train d'être réorienté. Un rééquilibrage au niveau de ces deux éléments va être fait, de façon à revenir à des teneurs optimums dans le sol. Un nouveau PRO (digestat de méthanisation) sera également épandu une année sur deux pour venir compléter les PRO en N, P et K sans avoir recours à des engrais minéraux.

Bibliographie

Articles

BODET J-M., BOUTHER A., CASTILLON P. et al. « Produits résiduaire organique : Une valeur fertilisante à ne pas négliger » in *Perspectives agricoles*, Septembre 2006, N°326 p.29-43.

Chambre d'Agriculture de la Région Alsace, « Terres d'Alsace, économie et conjoncture agricole », décembre 2013, N°109, 44p.

Rapports / publications

BELL A., MICHAUD A., DE CHEZELLES E., HOUOT S. « Réseau PRO: analyzing the French context of field experiments assessing agronomic, environmental and sanitary impact of organic residues recycled in agriculture » in Book of abstract, 15th RAMIRAN International Conference, 2013.

BODET Cécile. Analyse des besoins des acteurs du terrain sur l'acquisition de nouvelles références sur les effets agronomiques et environnementaux de l'épandage des produits résiduaire en Alsace. Mémoire de fin d'étude, 2013. 72p.

HOUILLON G., CHABRIER J-P., L'HUILLIER M. Etat des lieux des gisements et de la gestion de la matière organique en Alsace, perspectives de développement des installations de production de biogaz. Energievie.info. 7p [dispo sur <http://www.energievie.info/sites/default/files/documents/synthse-biogaz.pdf>]

HOUOT Sabine « Les enjeux agronomiques de la valorisation organique » in ADEME « Prévention et Gestion des déchets dans les territoires ». Recueil des interventions du colloque national, Nantes, [en ligne] 21, 22 et 23 Juin 2011. [consulté le 23 avril] Disponible sur : http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3DF623FBA010CAE2821B2F003011181502_tomcatlocal1320677091596.pdf&ei=tSRyU_CnIMqO0AXE5oFA&usg=AFQjCNG9-HQrpugWczU5pMHZw3Bx-F_G4A]

HOUOT S., PELTRE C., LASHERMES G., et al. « La valeur amendante des produits résiduaire organique ». Intervention colloque GCEOS, 27 Janvier 2011, [consulté le 12.05.2014], disponible sur : http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/en/component/docman/doc_download/275-intervention-colloque-gceos-s-houot.

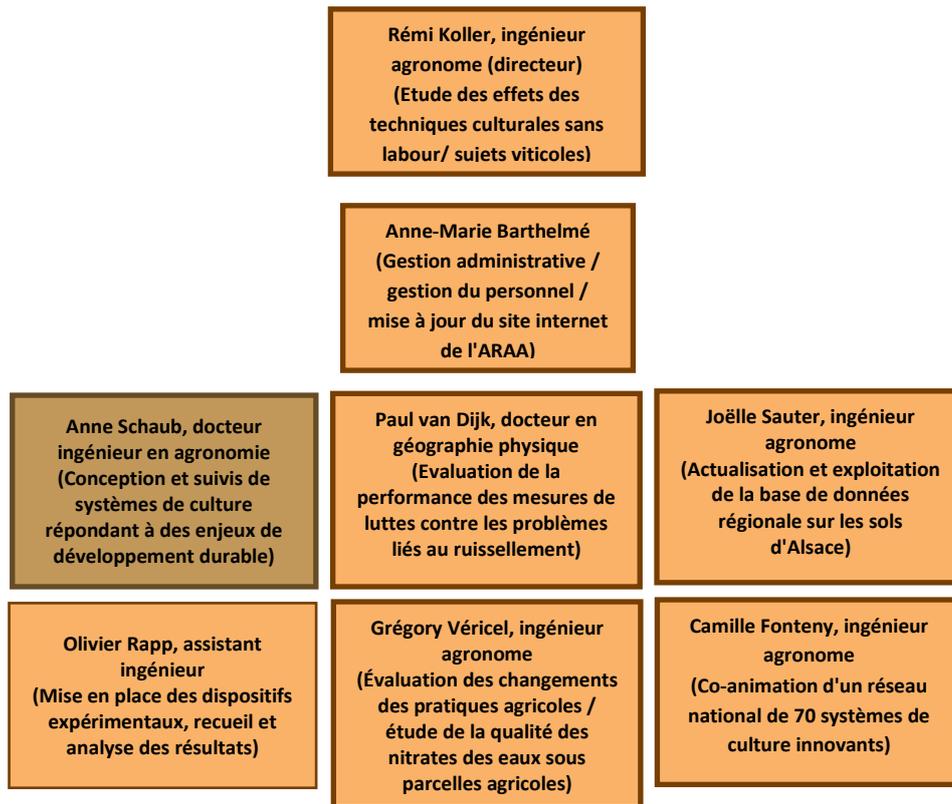
MATHERY Christian. Déchets, édition 2012 : chiffres clés. Angers : ADEME éditions, 2012. 50p.

SCHAUB A., VALENTIN N., POITRENAUD M. et al. Retour au sol des produits résiduaire organique: des essais au champ de longue durée. Intérêt d'un réseau. Actes de la Journée technique ADEME/INRA, Colmar, 27/11/2007, 180p.

SMRA, « Choisir une boue adaptée aux effets agronomiques recherchés » in Tabou(e) story, Info agriculteur 5. Conception éditoriale Savon Rouge, octobre 2000.

SMRA. Les chiffres clés dans le Haut-Rhin. Juin 2013

DOCUMENT 1 : Equipe de l'ARAA



(Document personnel, d'après araa-agronomie.fr)

DOCUMENT 2 : Les grandes catégories de PRO

Nom des produits	Origine	Consistance
Fumiers	Elevages de bovins, porcs, volailles, chevaux...sur litière	Mou à solide
Fientes	Elevage de volailles sans litière	Mou à solide
Lisiers	Elevages de bovins, porcs, volailles sans litière	Liquide
Boues	Traitement des eaux usées (villes, industries...) et des lisiers	Liquide à solide
Composts	Ordures ménagères, déchets verts, fumiers, boues compostées...	Solide
Vinasses	Distillerie des mélasses de sucrerie, des marcs et des lies	Liquide
Effluents	Eaux usées brutes (industries, élevages...)	Liquide

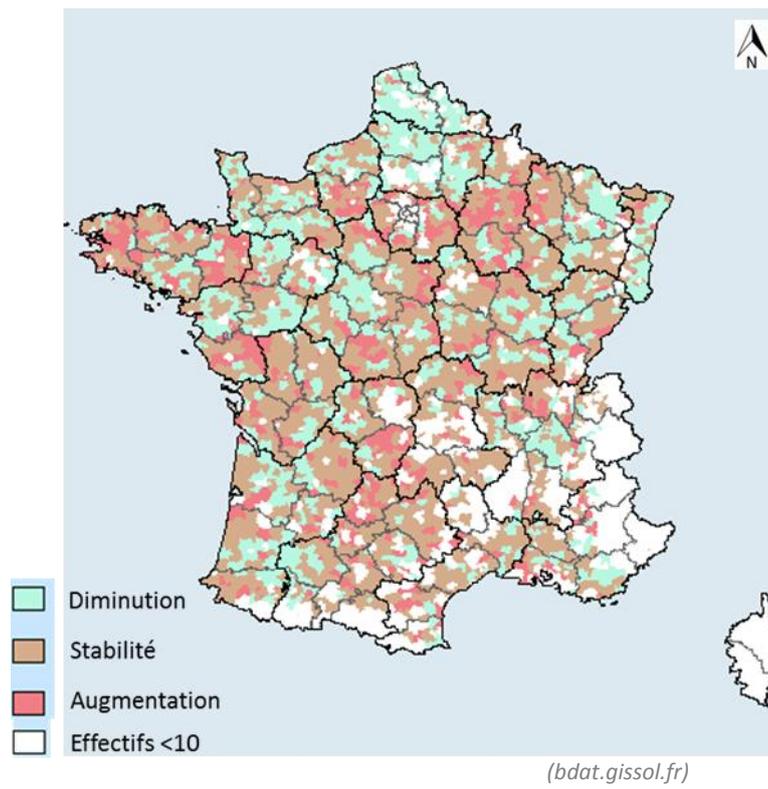
(BODET J-M. et al, 2006)

DOCUMENT 3 : Tonnage des différents Pro en Alsace (2013)

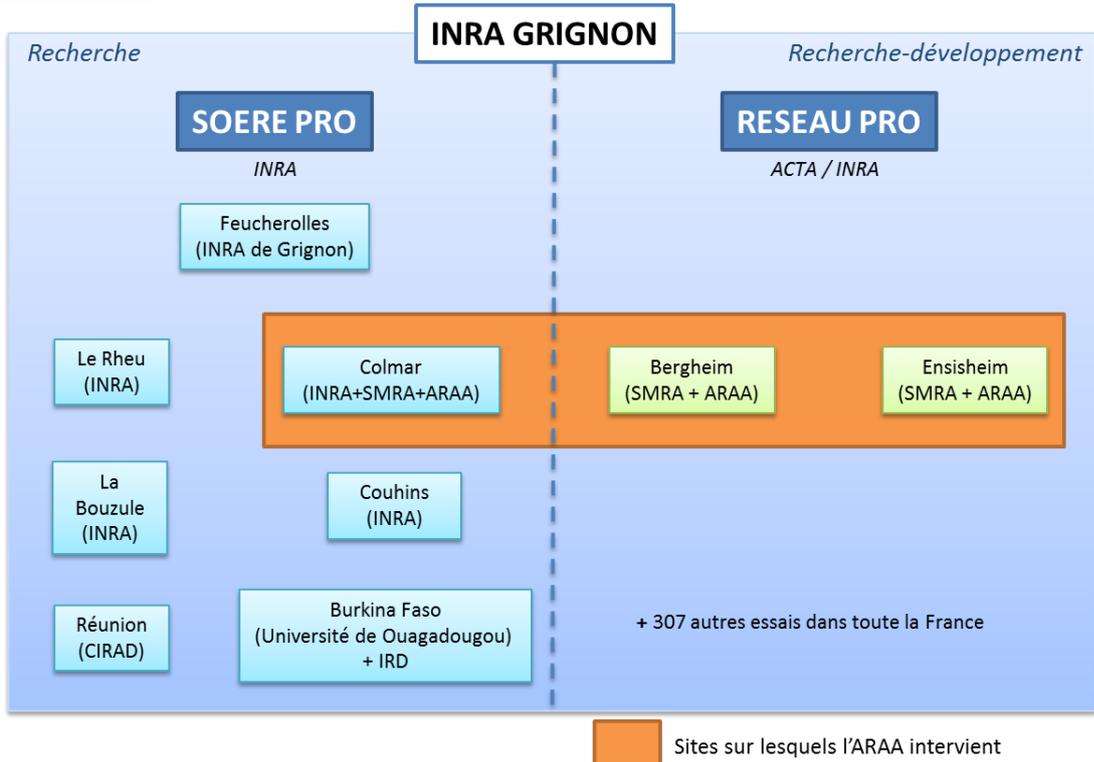
Type de PRO	Gisement Total (tMB/an)
Effluents d'élevages	1 827 700
Biodéchets	10 160
Déchets verts	101 400
Boues urbaines	176 000
Industrie agro-alimentaire	199 100
Boues industrielles	79 000
TOTAL	2 393 360

(D'après HOUILLON G., CHABRIER J-P., 2013)

DOCUMENT 4 : Evolution des stocks de carbone dans les sols français (entre 1995-1999 et 2000-2004)

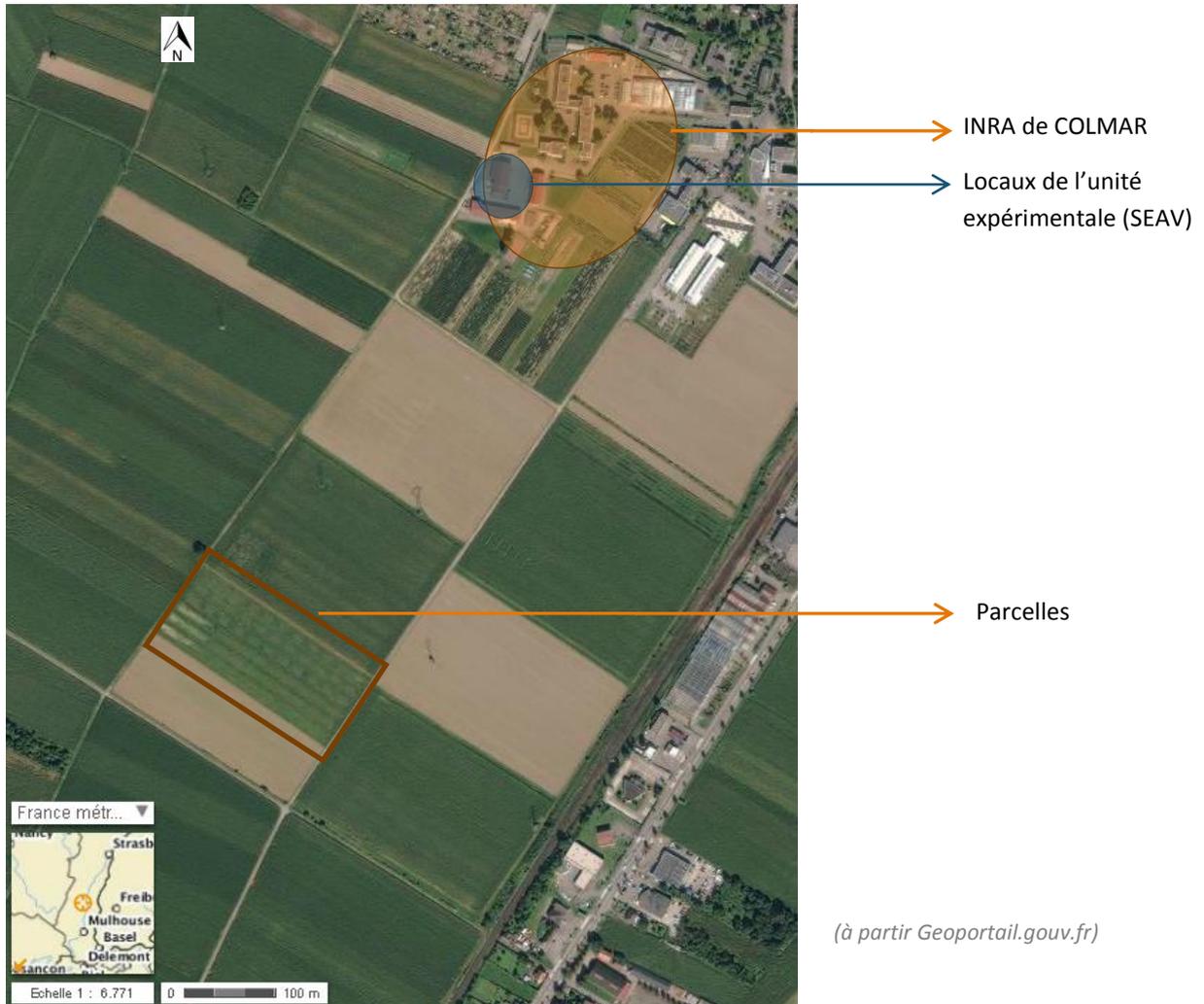


DOCUMENT 5 : Les réseaux PRO

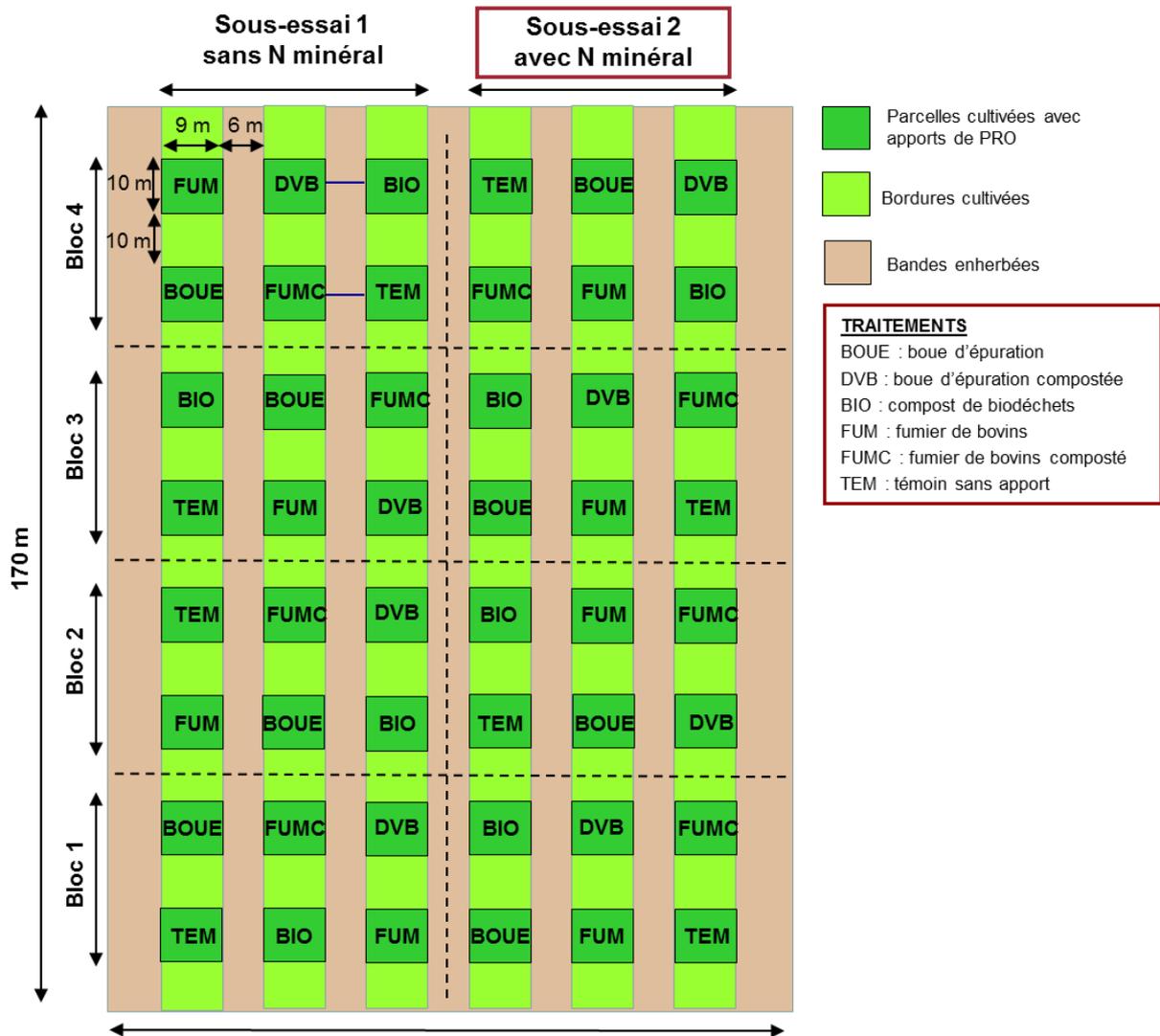


(Document personnel)

DOCUMENT 6 : Localisation du site de Colmar

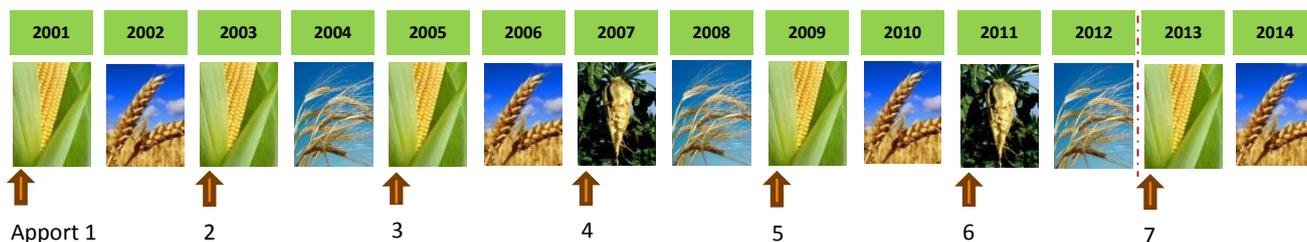


DOCUMENT 7 : Plan du dispositif expérimental



(Denis Montenach)

DOCUMENT 8 : Rotations mises en place sur la parcelle et années des apports



(Document personnel)

DOCUMENT 9 : Origine des PRO épanchus sur les parcelles depuis 2001

	BOUE	DVB	BIO	FUM	FUMC
2001	SITEUCE Colmar	BOUE SITEUCE compostée avec écorces de résineux et déchets verts	Plateforme d'Aspach	Fumier de vaches laitières de l'Unité expérimentale INRA de Mirecourt	FUM composté
2003	"	BOUE SITEUCE compostée avec palettes broyées et déchets verts	"	"	FUM composté
2005	"	BOUE SITEUCE compostée avec écorces de résineux et déchets verts	Plateforme de Marbache (54)	"	FUM composté
2007	"	BOUE SITEUCE compostée avec des déchets verts et refus de criblage	"	Fumier de vaches laitières d'une exploitation de Hymont (88)	FUM composté
2009	"	BOUE SITEUCE compostée avec des déchets verts et refus de criblage	Plateforme de Caudan (56)	Fumier de vaches laitières d'une exploitation de Hymont (88)	FUM composté
2011	"	BOUE SITEUCE compostée avec des déchets verts et refus de criblage	"	Fumier de vaches laitières d'une exploitation alsacienne	FUM composté

(Document personnel, d'après les bilans de campagne annuels)

DOCUMENT 10 : Détail des mesures réalisées sur les végétaux

Mesures de production	Analyses de qualité des récoltes
<ul style="list-style-type: none"> ♦ Poids frais biomasse végétale totale ♦ Poids frais grains / betteraves ♦ Teneur matière sèche des grains / betteraves ♦ Richesse en sucre extractible ♦ Poids frais des résidus de récolte ♦ Teneurs en matière sèche des résidus de récolte 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Eléments majeurs totaux dans les grains / betteraves ♦ Eléments majeurs totaux dans les résidus de récolte

(Document personnel, d'après les bilans de campagne annuels)

DOCUMENT 11 : Exemples de tableaux de résultats de l'analyse statistique

a. Tableau d'analyse de variance des biomasses cumulées sur les 12 ans

88	ANALYSE DE VARIANCE							
89		S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
90	VAR.TOT S-BLOC	2047,665	7	292,524				
91	VAR.FACTEUR 1	1967,318	1	1967,318	473,516	0,00014		
92	VAR.BLOCS	67,883	3	22,628	5,446	0,0991		
93	VAR.RESIDUELLE 1	12,464	3	4,155			2,038	2,01%
94	VAR.TOTALE	3071,019	47	65,341				
95	VAR.FACTEUR 2	516,211	5	103,242	9,079	0,00003		
96	VAR.INTER F1*2	165,985	5	33,197	2,919	0,02891		
97	VAR.TOT S-BLOC	2047,665	7	292,524	25,723	0		
98	VAR.RESIDUELLE 2	341,158	30	11,372			3,372	3,33%

b. Tableau de résultats du test N-K sur les biomasses cumulées sur les 12 ans (facteur PRO)

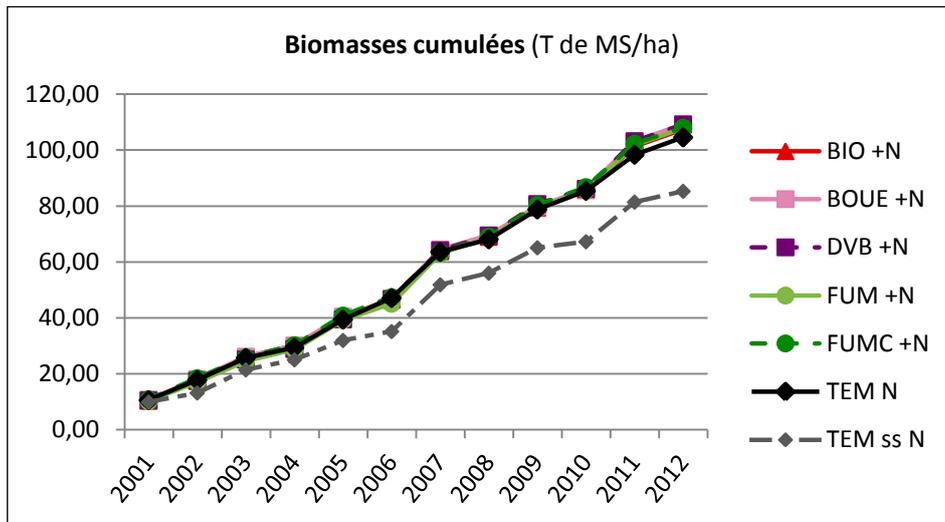
196	F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
199	1.0	BOUE	104,984	A		
200	4.0	FUM	103,481	A	B	
201	2.0	DVB	103,149	A	B	
202	5.0	FUMC	101,82	A	B	
203	3.0	BIO	99,755		B	
204	6.0	TEM	94,964			C

c. Tableau de résultats du test N-K sur les biomasses cumulées sur 12 ans, en cas d'interaction

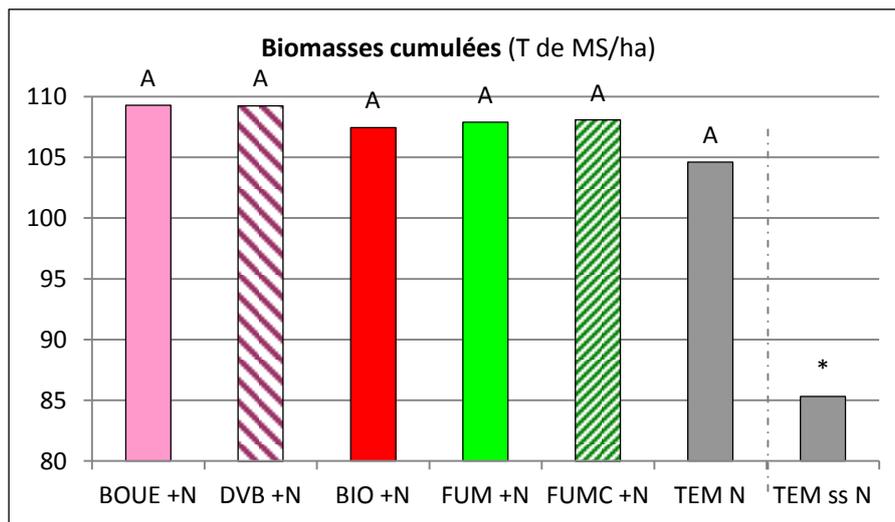
217	F1 F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
219	Sans N min.					
220	1.0 1.0	Sans N min. BOUE	100,689	A		
221	1.0 4.0	Sans N min. FUM	99,081	A		
222	1.0 2.0	Sans N min. DVB	97,05	A	B	
223	1.0 5.0	Sans N min. FUMC	95,548	A	B	
224	1.0 3.0	Sans N min. BIO	92,053		B	
225	1.0 6.0	Sans N min. TEM	85,321			C
227	Avec N min.					
228	2.0 1.0	Avec N min. BOUE	109,28	A		
229	2.0 2.0	Avec N min. DVB	109,248	A		
230	2.0 5.0	Avec N min. FUMC	108,092	A		
231	2.0 4.0	Avec N min. FUM	107,881	A		
232	2.0 3.0	Avec N min. BIO	107,457	A		
233	2.0 6.0	Avec N min. TEM	104,608	A		

(Source : documents personnels)

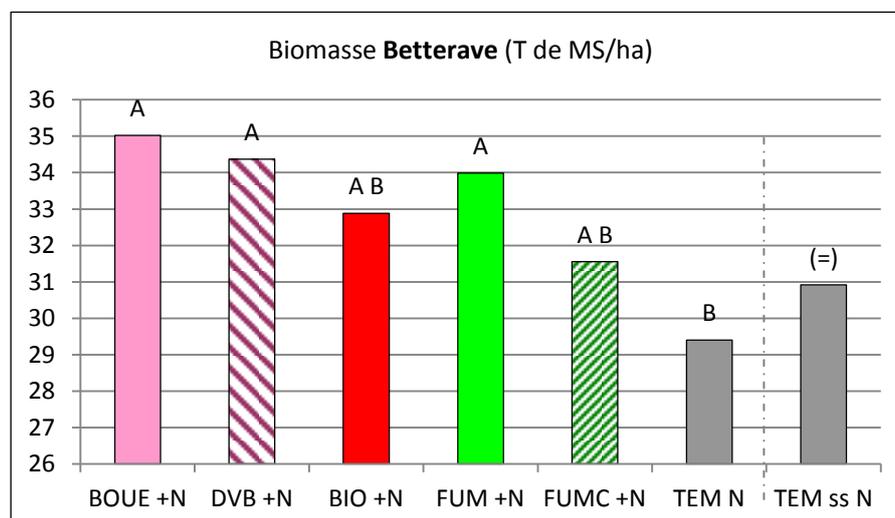
DOCUMENT 12 : Cumul des biomasses des parties récoltées sur les 12 ans (T de MS/ha)



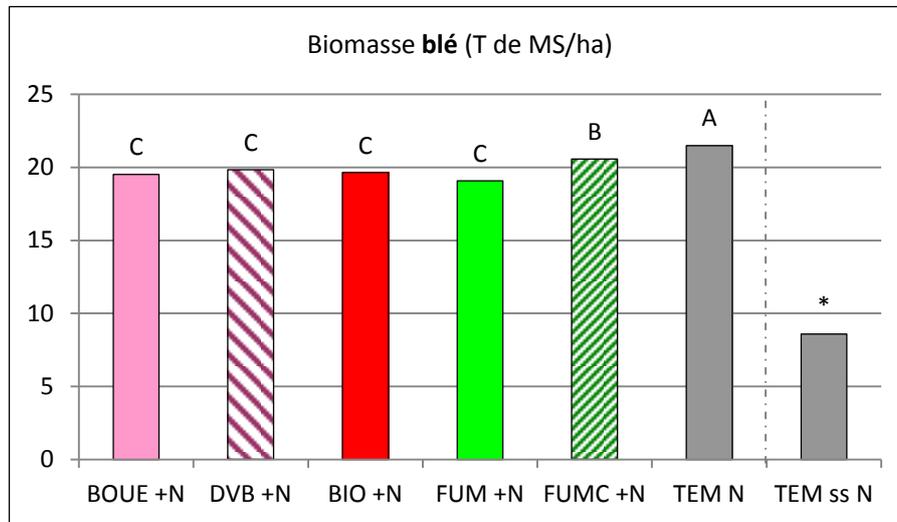
DOCUMENT 13 : Cumul des biomasses (p -value = 0,00003)



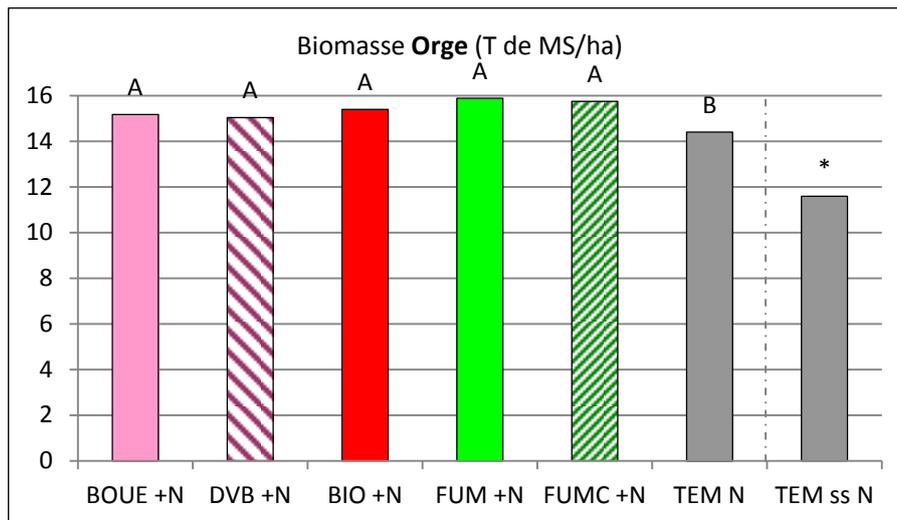
DOCUMENT 14 : Cumul des biomasses de betterave (p -value = 0,01159)



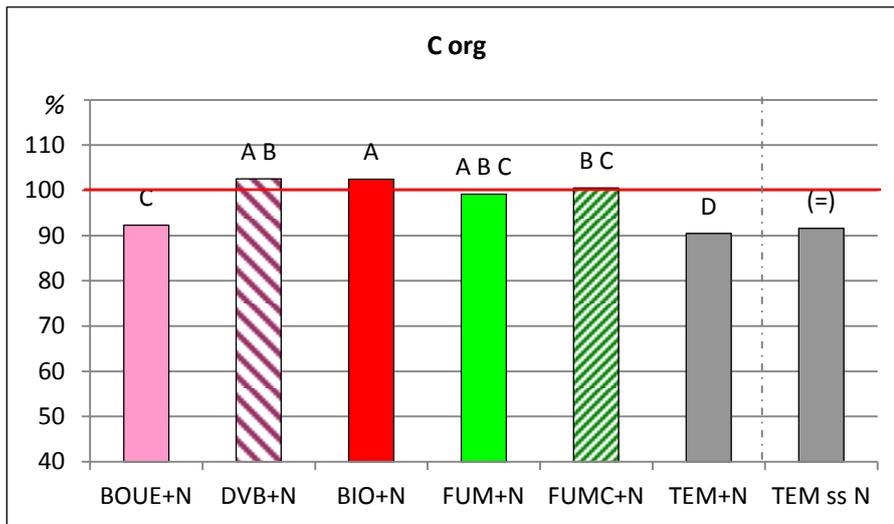
DOCUMENT 15 : Cumul des biomasses en blé (p -value = 0,00001)



DOCUMENT 16 : Cumul des biomasses en orge (p -value = 0,00012)

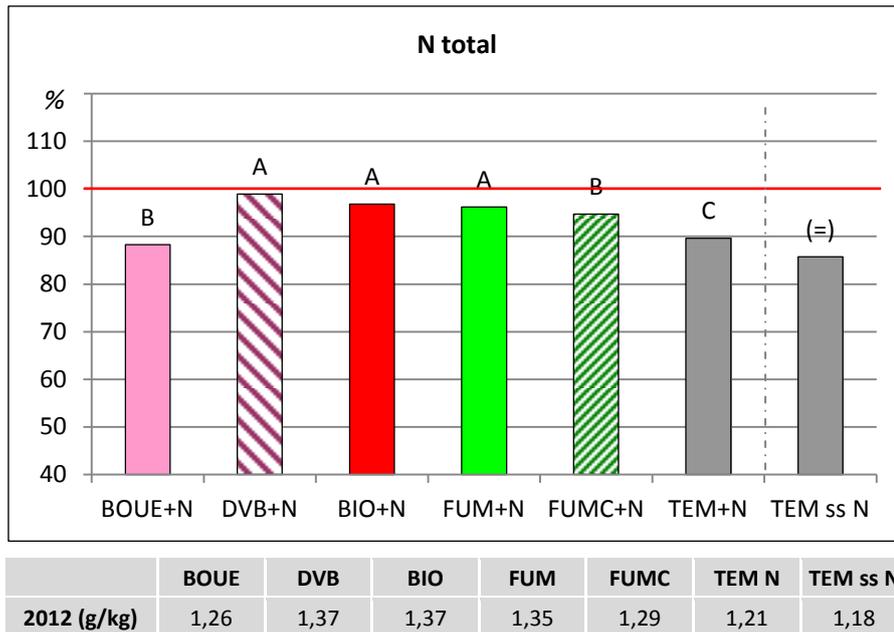


DOCUMENT 17 : Teneurs en carbone dans le sol : teneur en 2012 en % de l'état initial (2000), et teneurs réelles en 2012 en g/kg de terre ($p\text{-value} = 0,00001$)

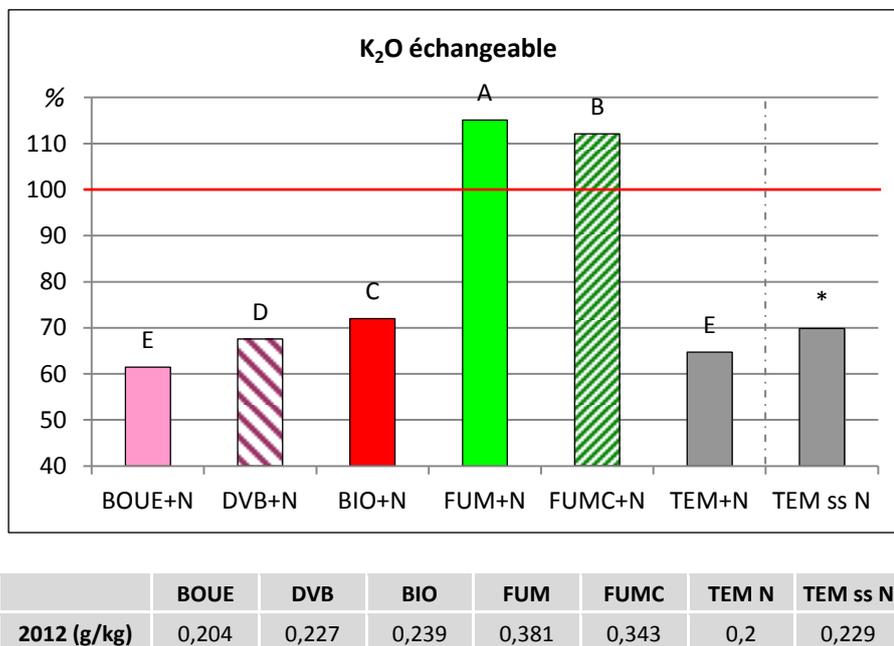


	BOUE	DVB	BIO	FUM	FUMC	TEM N	TEM ss N
2012 (g/kg)	13,77	15,12	15,42	14,62	14,2	12,8	13,67

DOCUMENT 18 : Teneurs en azote total dans le sol : teneur en 2012 en % de l'état initial (2000), et teneurs réelles en 2012 en g/kg de terre ($p\text{-value} = 0$)

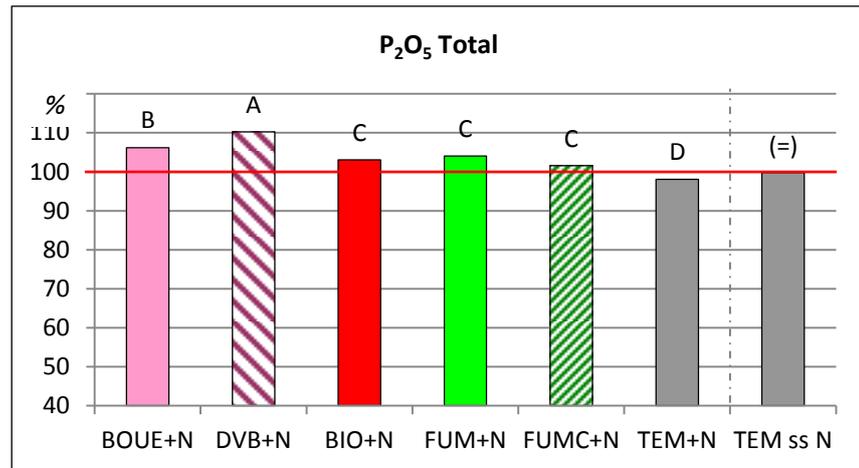


DOCUMENT 19 : Teneurs en potassium (K₂O) échangeable : teneur en 2012 en % de l'état initial (2000), et teneurs réelles en 2012 en g/kg de terre ($p\text{-value} = 0$)



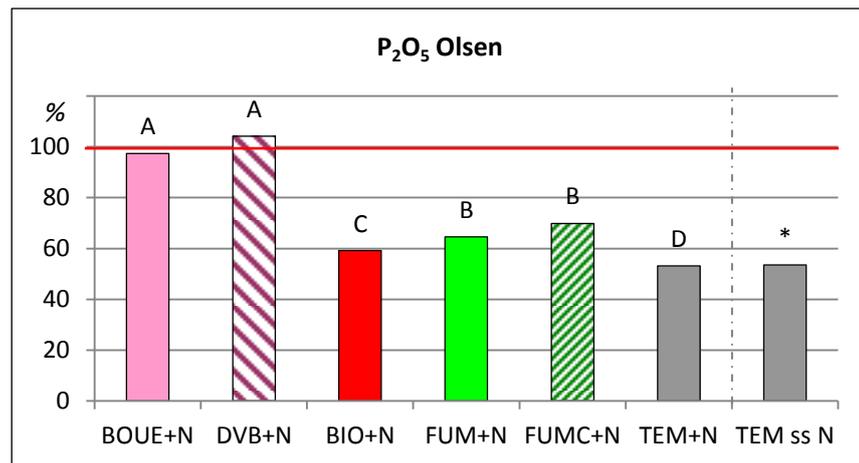
DOCUMENT 20 : Teneurs en phosphore total et Olsen dans le sol : teneur en 2012 en % de l'état initial (2000), et teneurs réelles en 2012 en g/kg de terre ($p\text{-value} = 0$)

a. Teneur en P2O5 Total ($p\text{-value} = 0$)



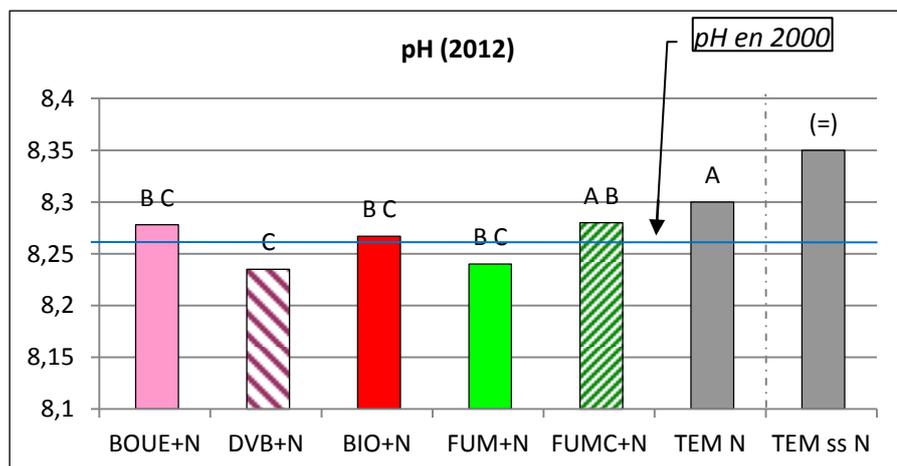
	BOUE	DVB	BIO	FUM	FUMC	TEM N	TEM
2012 (g/kg)	2,698	2,8	2,618	2,643	2,58	2,492	2,535

b. Teneur en P2O5 Olsen ($p\text{-value} = 0$)

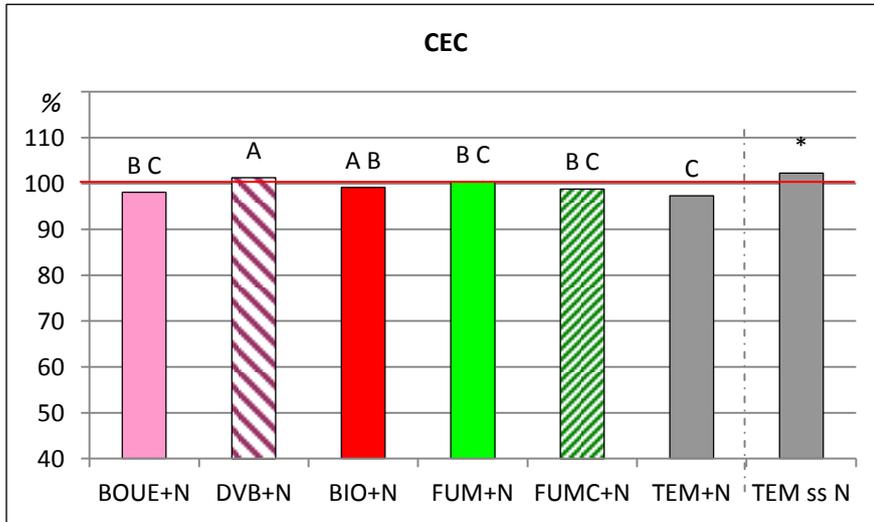


	BOUE	DVB	BIO	FUM	FUMC	TEM N	TEM ss N
2012 (g/kg)	0,074	0,074	0,042	0,053	0,044	0,034	0,038

DOCUMENT 21 : pH en 2012 ($p\text{-value} = 0,00031$)



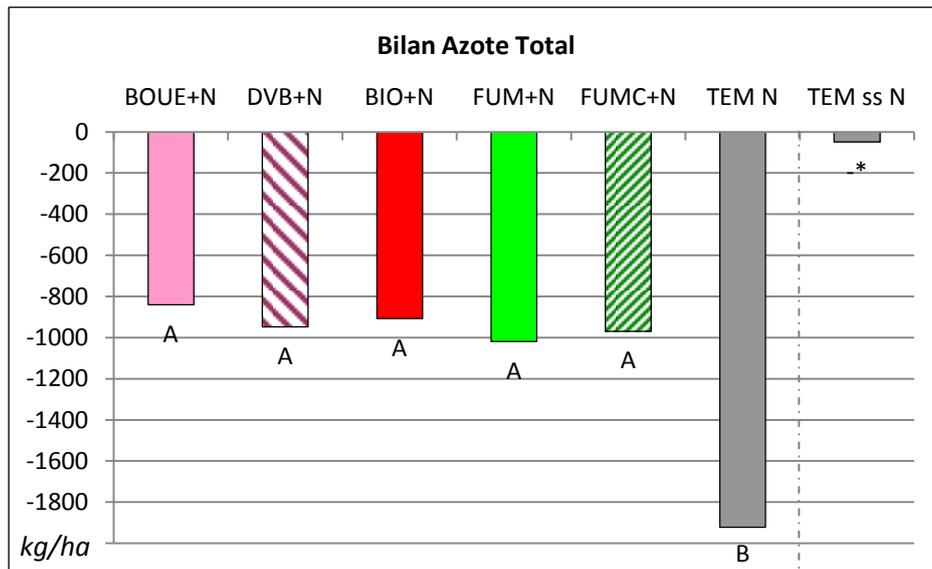
DOCUMENT 22 : Evolution de la CEC : teneur en 2012 en % de l'état initial (2000), et teneurs réelles en 2012 en g/kg de terre (*p-value* = 0,00028)



	BOUE	DVB	BIO	FUM	FUMC	TEM N	TEM ss N
2012 (g/kg)	16,8	17,35	17,125	16,925	16,85	16,4	15,95

DOCUMENT 23 : Bilan de l'azote total dans les systèmes

a. Résultat de l'analyse statistique ($p\text{-value} = 0$)

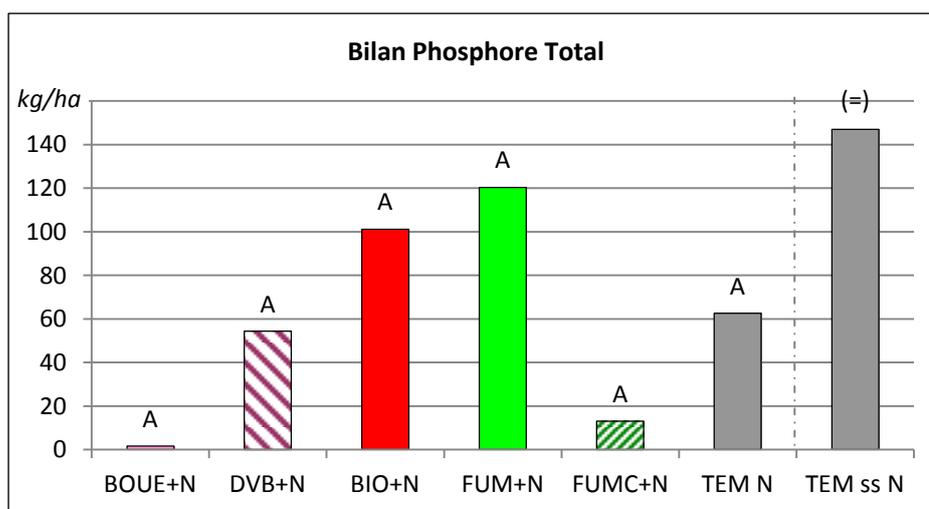


b. Variables du bilan

(kg/ha)	BOUE +N	DVB +N	BIO +N	FUM +N	FUMC +N	TEM N	TEM ss N
N Total apporté pendant 12 ans	1517,33	2239,13	2041,40	2118,97	2059,14	2883,47	0
Exportation d'N par les récoltes	1286,22	1346,32	1298	1291,94	1354,05	1470,37	730
Δ des stocks d'N dans le sol entre 2000 et 2012	-609,7	-54,6	-163,8	-191,1	-263,9	-509,6	-718,9

DOCUMENT 24 : Bilan du phosphore

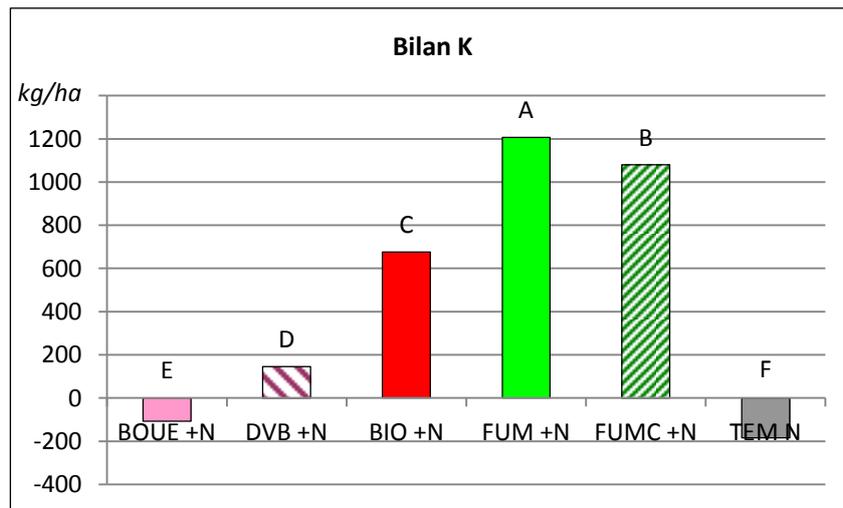
a. Résultat de l'analyse statistique : test de Newman-Keuls non significatif ($p\text{-value} = 0,12712$)



b. Variables du bilan

(kg/ha)	BOUE +N	DVB +N	BIO +N	FUM +N	FUMC +N	TEM N	TEM ss N
P tot apporté	527,52	639,66	290,53	324,42	331,75	118,37	45,78
Exp par les récoltes	279,218	281,414	268,714	282,147	281,323	256,364	200,657
Δ des stocks dans le sol	249,959	412,63	122,996	162,672	63,482	-75,384	-7,935

DOCUMENT 25 : Bilan « entrée-sorties » du potassium (*p-value = 0*)



DOCUMENT 26 :

a. Bilan économique de la conduite BOUE

€	Conduite BOUE + minérale	Conduite minérale
Charges fertilisation	1 262,84	1 983,04
Produits	21 102,82	20 647,39
produits - charges de fertilisation	19 839,99	18 664,36
différence de marge /12 ans/ha		1 175,63
différence de marge /an/ha		97,97 €

b. Bilan économique de la conduite avec DVB

€	Conduite DVB + minérale	Conduite minérale
Charges fertilisation	1 832,78	1 983,04
Produits	21 832,36	20 647,39
produits - charges de fertilisation	19 999,59	18 664,36
différence de marge /12 ans/ha		1 335,23
différence de marge /an/ha		111,27 €

c. Bilan économique de la conduite avec BIO

€	Conduite BIO + minérale	Conduite minérale
Charges fertilisation	2 165,33	1 983,04
Produits	21 143,41	20 647,39
produits - charges de fertilisation	18 978,08	18 664,36
différence de marge /12 ans/ha		313,72
différence de marge /an/ha		26,14 €

FICHE SIGNALÉTIQUE « Génie Biologique »

Nom et prénom de l'ÉTUDIANT :

BARRERE Aurore

Nom de l'ENTREPRISE :

ARAA, Association pour la Relance Agronomique en Alsace

Adresse complète : 2 rue de Rome

BP30022 SCHILTIGHEIM

67013 STASBOURG cedex

téléphone : **03.88.19.17.52**

fax :

secteur d'activité de l'entreprise

Agro-alimentaire		Elevage – productions animales		Ecologie – gestion des espaces naturels		Biologie – physiologie animale	
Agrochimie - agrofournitures		Cultures spécialisées : maraîchage, horticulture, arboriculture		Aménagement – développement rural		Biologie – physiologie végétale	
Biotechnologies - microbiologie		Viticulture - oenologie		Para-pharmacie		Biologie moléculaire - cellulaire	
Agriculture – productions végétales	X	Agronomie – agri-environnement - eau	X	Chimie-biochimie			

responsable du stage dans l'entreprise :

nom : **SCHAUB Anne**

fonction : **Ingénieur agronome**

nom de l'enseignant qui a suivi votre stage :

Véronique Horellou

TITRE exact de votre rapport :

Analyse de la valeur agronomique de produits résiduels organiques (PRO) à partir d'une expérimentation de longue durée

Nombre de pages du rapport : 23

Mots-clés décrivant votre sujet :

1er mot-clé : thématique du stage

Recherche et recherche-développement	Enquête
Qualité - contrôle qualité	Production
Expérimentation	Sélection
Etude	Analyse

4 mots-clés libres

PRO (Produits résiduels organique)

Matières organiques

Fertilisation organique

Déchets