



*Syndicat Mixte Recyclage Agricole  
du Haut-Rhin*

A horizontal green brushstroke is positioned below the text, extending from the right side of the page towards the center.

**CONSEQUENCES DE L'EPANDAGE  
DE PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES  
SUR LA QUALITE DES SOLS  
ET DES PRODUITS RECOLTES**

**EXPERIMENTATION DE LONGUE DUREE  
SITE DE COLMAR**

**Bilan de la 11<sup>ème</sup> campagne  
2011**



**ADEME**



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

Septembre 2013

*Projet réalisé avec le concours de :*

- *l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace*
- *le Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin (SMRA 68)*
- *l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse*
- *l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*
- *Arvalis – Institut du Végétal*
- *le Syndicat Intercommunal de Traitement des Eaux Usées de Colmar et Environs*
- *la Société SEDE Environnement*
- *Veolia Environnement Recherche et Innovation / CREED*
- *la Société Terralys*
- *les Brasseries Kronenbourg*
- *la Région Alsace*
- *le Conseil Général du Haut-Rhin*

# CONSEQUENCES DE L'EPANDAGE DE PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES SUR LA QUALITE DES SOLS ET DES PRODUITS RECOLTES

## EXPERIMENTATION DE LONGUE DUREE DU SITE DE COLMAR

### Bilan de la 11<sup>ème</sup> campagne 2011

Denis Montenach <sup>(1)</sup>, Frédéric Hammel <sup>(1)</sup>, Anne Schaub-Tremel <sup>(4)</sup>,  
Magali Imhoff <sup>(3)</sup>, Nathalie Valentin <sup>(3)</sup>, Sabine Houot <sup>(2)</sup>

Ont également collaboré à la gestion, l'animation et/ou la mise en œuvre de l'expérimentation en 2011 :

- L'équipe technique du Domaine Expérimental de l'INRA Colmar
- L'équipe technique du Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin
- Le Service Déconcentré d'Appui à la Recherche de l'INRA Colmar
- A. Baechtold <sup>(5)</sup>, JY. Chapot <sup>(7)</sup>, JE. Delphin <sup>(7)</sup>, L. Ley <sup>(1)</sup>, M. Lollier <sup>(8)</sup>, J. Masson <sup>(6)</sup>, V. Mercier <sup>(2)</sup>, A. Michaud <sup>(2)</sup>, JN. Rampon <sup>(2)</sup>, P. Valentin <sup>(5)</sup>

Les différentes analyses ont été réalisées par les laboratoires suivants :

- INRA – Laboratoire d'Analyse des Sols – Arras (62)
- INRA – Unité de Service d'Analyses Végétales et Environnementales – Villenave-d'Ornon (33)
- INRA – Unité Mixte de Recherche Environnement et Grandes Cultures – Thiverval Grignon (78)
- Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche de l'Aisne – Laon (02)
- SADEF – Pôle Agro-Environnemental – Aspach-Le-Bas (68)

- (1) INRA Colmar – Unité Expérimentale Agronomique et Viticole
- (2) INRA Grignon – Unité Mixte de Recherche 1091 Environnement et Grandes Cultures
- (3) Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin
- (4) Association pour la Relance Agronomique en Alsace
- (5) INRA Colmar – Service Déconcentré d'Appui à la Recherche
- (6) INRA Colmar – Présidence du centre
- (7) INRA Colmar – Unité Mixte de Recherche 1121 Laboratoire Agronomie et Environnement
- (8) Université de Haute-Alsace

## SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>4</b>
<b>RAPPEL DES OBJECTIFS .....</b>	<b>6</b>
<b>1. PRESENTATION DE LA CAMPAGNE 2011.....</b>	<b>7</b>
1.1 Localisation du site de Colmar .....	7
1.2 Le dispositif expérimental .....	7
1.2.1 Dispositif central .....	7
1.2.2 Dispositifs annexes.....	9
1.2.3 Cultures .....	9
1.2.4 Instrumentation du site de plein champ.....	9
1.2.4.1 Bougies poreuses .....	9
1.2.4.2 Lysimètres à mèche.....	10
1.2.5 Dispositifs annexes.....	10
1.2.5.1 Station météorologique.....	10
1.2.5.2 Cases lysimétriques.....	10
1.3 La campagne expérimentale 2011 .....	13
1.3.1 Données climatiques .....	13
1.3.2 Conduite agronomique de l'essai .....	14
1.3.2.1 Fertilisation minérale.....	14
1.3.2.2 Parcelles de bordures.....	14
1.3.2.3 Protection de la culture.....	14
1.4 Présentation de la 6 <sup>ème</sup> campagne d'épandage des produits résiduaux organiques.....	19
1.4.1 Origine des produits résiduaux organiques.....	19
1.4.2 Mise en œuvre du chantier d'épandage .....	19
1.4.3 Analyses sur les PRO.....	20
1.5 Suivi de la qualité des sols .....	20
1.6 Mesures et analyses sur les produits récoltés .....	20
1.6.1 Mesures de la production de betterave .....	20
1.6.2 Analyse des récoltes.....	21
1.7 Suivi de l'azote minéral des sols cultivés .....	23
1.8 Suivi de la qualité de eaux de pluie .....	23
1.9 Analyse des résultats : outils et méthodes statistiques .....	23
1.10 Laboratoires partenaires impliqués pour les analyses physiques et chimiques des différentes matrices analysées .....	24

<b>2. PRINCIPAUX RESULTATS .....</b>	<b>25</b>
2.1 Évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'horizon labouré .....	25
2.1.1 Carbone organique .....	25
2.1.2 Autres paramètres agronomiques .....	26
2.2 Caractéristiques des produits résiduaux organiques épandus en 2011 .....	32
2.2.1 Caractéristiques physico-chimiques des produits résiduaux organiques.....	32
2.2.1.1 Matière organique .....	32
2.2.1.2 Cinétiques de minéralisation carbone et azote .....	34
2.2.1.3 Éléments majeurs, éléments traces et composés traces organiques .....	36
2.2.2 Flux d'éléments associés aux épandages.....	48
2.2.2.1 Flux d'éléments majeurs.....	48
2.2.2.2 Flux d'éléments traces et de composés traces organiques .....	49
2.3 Effet des apports organiques sur les rendements de betterave en 2011.....	57
2.3.1 Peuplements levée et récolte .....	57
2.3.2 Rendements betteraves et biomasses de résidus de récolte.....	58
2.3.3 Richesses et rendements en sucre .....	61
2.4 Effet des apports organiques sur la qualité des produits récoltés.....	64
2.4.1 Concentration des betteraves en éléments totaux .....	64
2.4.1.1 Éléments majeurs .....	64
2.4.1.2 Éléments traces .....	66
2.4.2 Concentrations des résidus de récolte en éléments totaux.....	72
2.4.2.1 Éléments majeurs .....	72
2.4.2.2 Éléments traces .....	74
2.4.3 Exportation d'éléments par les betteraves .....	80
2.4.3.1 Éléments majeurs .....	80
2.4.3.2 Éléments traces .....	80
2.4.4 Stockage des éléments par les résidus de récolte.....	80
2.4.4.1 Éléments majeurs .....	80
2.4.4.2 Éléments traces .....	81
2.4.5 Synthèse des effets significatifs sur la qualité des produits récoltés .....	88
2.5 Dynamique de l'azote dans les sols .....	90
2.5.1 Reliquats d'azote avant épandage .....	90
2.5.2 Reliquats d'azote avant semis .....	90
2.5.3 Reliquats d'azote après récolte .....	91
2.6 Suivi de la qualité des eaux de pluie .....	98
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>101</b>
<b>BILAN FINANCIER.....</b>	<b>109</b>
<b>ACTEURS ET PARTENAIRES .....</b>	<b>111</b>
<b>INDEX DES SIGLES UTILISÉS.....</b>	<b>113</b>

## RAPPEL DES OBJECTIFS

La plate-forme expérimentale, implantée sur le domaine expérimental du centre INRA de Colmar, permet depuis 2000, et pour une durée d'au moins 12 ans, l'**étude des impacts de l'épandage agricole de produits résiduels organiques (PRO) sur la qualité des sols, des eaux et des cultures.**

L'objectif du dispositif est de caractériser les impacts environnementaux de **3 types de PRO** – boue d'épuration urbaine, biodéchet (compost de fraction fermentescible des ordures ménagères), effluent d'élevage – et de mettre en évidence **l'effet de leur compostage** sur ces impacts, dans le cadre d'un épandage raisonné d'un point de vue agronomique et conforme à la réglementation. Cela inclut :

- l'observation à long terme des éventuelles accumulations d'éléments traces (ETM) et de composés traces organiques (CTO) dans les sols, et leur éventuel prélèvement par les cultures ;
- l'évaluation à court et long terme des impacts des épandages sur la qualité des eaux percolant à travers les sols ayant reçu les épandages ;
- l'estimation à court et long terme des impacts environnementaux liés à la connaissance insuffisante de la valeur agronomique des déchets.

La plate-forme expérimentale de Colmar fait partie d'un **réseau d'expérimentations**, incluant déjà un site similaire créé dans les Yvelines par l'INRA et le CRPE (Centre de Recherche pour la Propreté et l'Environnement, Veolia Environnement). Y sont étudiés les effets de différents composts d'origine urbaine sur la qualité des sols, des eaux et des végétaux.

Un autre essai complémentaire a été installé à Rennes (INRA SAS). Il est dédié aux effluents d'élevage.

Ce réseau, coordonné par l'INRA de Grignon, est reconnu par l'INRA depuis 2007 comme Observatoire de recherche en environnement « *Produits résiduels organiques* » (ORE PRO). En 2010, il est labellisé **SOERE** (Système d'observation et d'expérimentation pour la recherche en Environnement) par l'Alliance ALLENI en associant aux 3 sites déjà cités, l'essai de La Bouzule à Nancy et les essais de Couhins pilotés par l'INRA de Bordeaux.

Un réseau complémentaire d'expérimentations plus légères sur les PRO est en cours de création grâce au projet CASDAR « Réseau PRO » lancé en 2011. Ces essais permettent de compléter le réseau du SOERE en apportant des données sur d'autres produits et d'autres situations agro-pédo-climatiques. Deux essais menés dans le Haut-Rhin par le Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin et l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace font partie du Réseau PRO : un à Bergheim et un à Ensisheim.

# 1. PRESENTATION DE LA CAMPAGNE 2011

## 1.1 Localisation du site de Colmar

L'expérimentation est implantée sur une parcelle du domaine expérimental agronomique et viticole de l'INRA de Colmar (68), d'une surface utile de 2,24 ha, orientée est-ouest, plane à déclivité faible à nulle. Cette parcelle repose sur des limons profonds caractéristiques de la zone pédo-climatique. Les premières analyses la désignent comme homogène et naturellement bien drainée.

La parcelle a reçu des scories potassiques de 1956 à 1980 (environ 150 kg K<sub>2</sub>O /ha chaque année) et des engrais phosphatés régulièrement avant la mise en place de l'essai. Le sol est initialement assez bien pourvu en phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Olsen : 70 mg/kg) et potasse (K<sub>2</sub>O échangeable : 220 mg/kg soit 183 mgK/kg).

L'expérimentation est conduite dans des conditions voisines des pratiques agricoles locales et sans irrigation. Les épandages sont conformes aux réglementations en vigueur, notamment l'arrêté préfectoral local pris en application de la directive « Nitrates », hormis la mise en place de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) pour lesquelles le site dispose d'une dérogation à des fins expérimentales.

## 1.2 Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comprend un essai central partagé en deux sous-essais de type « bloc Fischer » à quatre blocs, et deux essais adjacents sans répétition (figure 1). Chacune des parcelles élémentaires fait 10 m de longueur et 9 m de largeur pour permettre l'utilisation des matériels de grande culture, soit 90 m<sup>2</sup> de surface brute. Des bordures cultivées, de mêmes dimensions, et des allées enherbées, de 6 m de largeur, isolent chaque parcelle élémentaire. L'ensemble du dispositif couvre 2,016 ha.

### 1.2.1 Dispositif central

Le principal facteur étudié est le type de PRO épandu tous les deux ans (tableau 1). Il comporte six modalités. Dans le cadre de l'organisation des différents sites en réseau, et de la gestion de l'ensemble des résultats via une base de données, une nomenclature commune de désignation des types de PRO a été instaurée (en gras) :

- ✓ modalité 1 : Boue urbaine déshydratée – **BOUE** – T1
- ✓ modalité 2 : Même boue urbaine compostée – **DVB** – T2
- ✓ modalité 3 : Compost de biodéchets issus d'une collecte sélective de la Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères – **BIO** – T3
- ✓ modalité 4 : Fumier de bovin – **FUM** – T4
- ✓ modalité 5 : Même fumier de bovin composté – **FUMC** – T5
- ✓ modalité 6 : Témoin sans apport organique – **TEM** – T6

Tableau 1 : Apports de PRO effectués depuis 2001 (Doses calculées pour apporter 170 kg N<sub>total</sub> / ha par PRO et par épandage)

	14 et 15/05/2001	6 et 7/02/2003	25 et 26/01/2005	5 et 6/02/2007	17 et 18/02/2009	13 et 14/12/2010	Cumul sur 10 ans
	tonnes MS / ha						
BOUE	3,5	3,2	2,5	2,5	2,5	2,1	16,3
DVB	10,6	6,9	6,2	5,8	6,1	7,1	42,7
BIO	10,9	9,5	9	7,7	5,7	7,8	50,6
FUM	8,9	7,4	7,9	6,4	6,7	5,4	42,7
FUMC	6,1	6,5	7,2	5,6	5	6,4	36,8

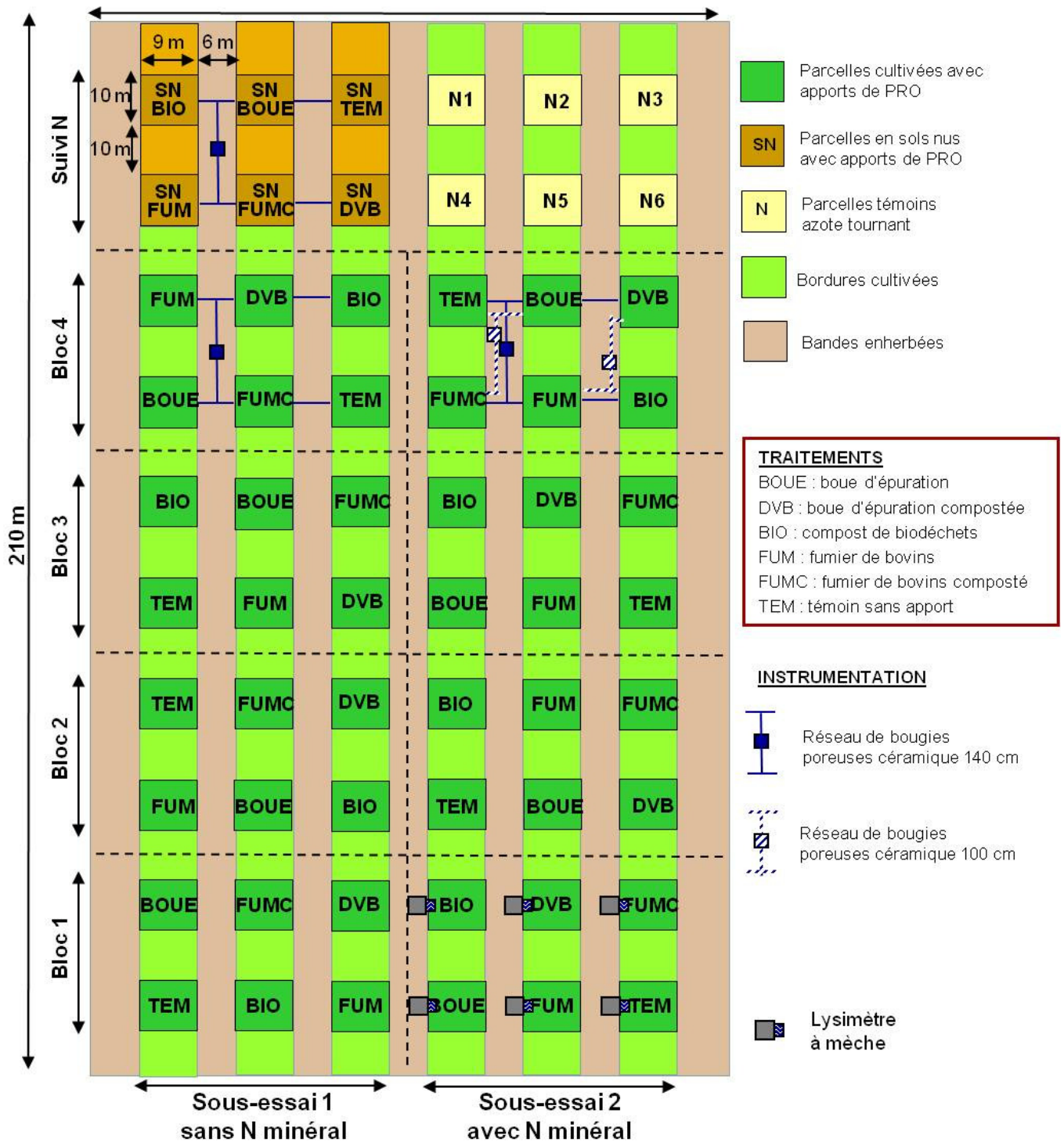


Figure 1 : Plan du dispositif expérimental longue durée de Colmar



Le facteur PRO est croisé avec un deuxième facteur correspondant à la complémentation minérale azotée, qui compte deux niveaux :

✓ niveau 1 : pas de complémentation minérale azotée ou **SANS ENGRAIS**.

Ce niveau doit permettre de discriminer les différents PRO épandus en évaluant et comparant leur valeur agronomique.

✓ niveau 2 : complémentation minérale azotée, ou **AVEC ENGRAIS**.

La complémentation minérale est ajustée selon le coefficient apparent d'utilisation de l'azote des PRO et le calcul du bilan prévisionnel d'azote dans les sols.

Le niveau 2 permet de se positionner en conditions normales d'utilisation des PRO, proches des pratiques agricoles, soit dans des conditions de fertilisation *a priori* similaires et optimales pour la croissance de la culture. Il permet alors d'étudier les impacts environnementaux éventuels liés à la présence de micropolluants dans les PRO épandus.

Les dosages de micropolluants (ETM et CTO) dans les sols et les cultures sont réalisés uniquement sur ce niveau.

Sur la culture de betterave, des complémentations en P et K sont apportées. En 2007, la complémentation PK a été apportée uniformément sur l'ensemble de l'essai. En 2011 (seconde culture de betterave), cette complémentation est ajustée par traitement PRO et limitée au sous-essai fertilisé (niveau 2).

### 1.2.2 Dispositifs annexes

Deux dispositifs annexes permettent un suivi plus poussé de l'azote.

Du côté sans N minéral, 6 parcelles élémentaires reçoivent les traitements organiques mais sont maintenues en sol nu, pour évaluer l'impact des seuls apports organiques sur la qualité des sols et des eaux (parcelles SN sur la figure 1).

Du côté avec N minéral, 6 parcelles élémentaires sont cultivées sans apport organique mais avec rotation de la complémentation minérale (parcelles N sur la figure 1). Chaque année, deux parcelles différentes ne sont pas complémentées en azote minéral et sont destinées à évaluer la fourniture en azote du sol, sans PRO ni engrais, une année donnée. En 2011, les parcelles N1 et N4 n'ont pas reçu d'engrais minéral azoté.

### 1.2.3 Cultures

La succession 2001-2012 choisie est la suivante :

2001 : maïs grain	2007 : betterave sucrière
2002 : blé d'hiver	2008 : orge de printemps brassicole
2003 : maïs grain	2009 : maïs grain
2004 : orge de printemps brassicole	2010 : blé d'hiver
2005 : maïs grain	2011 : betterave sucrière
2006 : blé d'hiver	2012 : orge de printemps brassicole

Le choix de la rotation maïs/blé/betterave/orge repose sur la diversité et la représentativité régionale des cultures et des produits transformés issus des récoltes, ainsi que la diversité des modèles biologiques.

En 2011, la culture suivie est une **betterave sucrière, variété Python**, variété la plus semée en France cette année là. C'est la deuxième implantation d'une culture de betterave sucrière sur le dispositif depuis le début de l'expérimentation. En 2007 la variété implantée était Léopard, aujourd'hui peu répandue.

### 1.2.4 Instrumentation du site de plein champ

#### 1.2.4.1 Bougies poreuses

En 2001, 18 parcelles élémentaires sont chacune équipées de 3 bougies poreuses en céramique implantées à environ 140 cm de profondeur : 6 parcelles en sols nus, 6 parcelles cultivées avec azote minéral et 6 parcelles cultivées sans azote minéral (bloc IV). Ces 54 bougies permettent le prélèvement de la solution du sol pour suivre la qualité de l'eau susceptible de rejoindre la nappe phréatique (figure 2).

Des bougies poreuses en céramique sont également implantées à 100 cm de profondeur dans les 6 parcelles cultivées avec complément azoté minéral du bloc IV (3 bougies par parcelle).

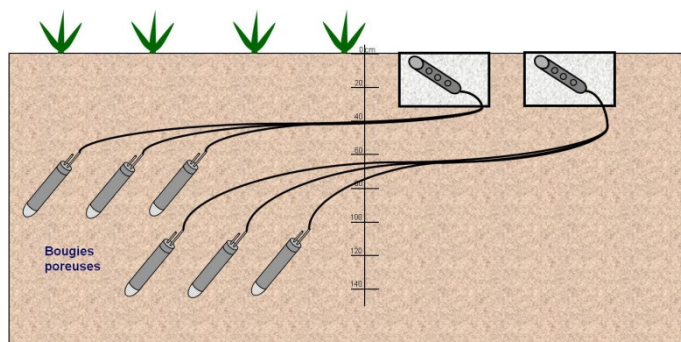


figure 2 : Dispositif de bougies poreuses en céramique

#### 1.2.4.2 Lysimètres à mèche

En novembre 2009, les 6 parcelles cultivées avec complémentarité en azote minéral du bloc I ont été chacune équipées de deux plaques lysimétriques de surface 25x25 cm installées à 45 cm de profondeur (figure 3). Ces équipements permettent le prélèvement de l'eau drainée sous l'horizon de labour.

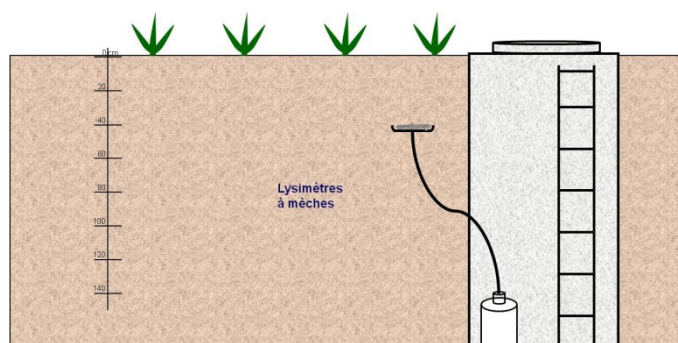


figure 3 : Schéma d'un lysimètre à mèche

### 1.2.5 Dispositifs annexes

#### 1.2.5.1 Station météorologique

Une station météorologique complète (température de l'air, pluviométrie, ETP, rayonnement) est implantée à environ 500 m du dispositif.

Un pluviomètre réfrigéré, installé en 2003, permet d'échantillonner les précipitations atmosphériques humides.

#### 1.2.5.2 Cases lysimétriques

Depuis début 2009, 6 cases lysimétriques complètent le site expérimental de plein champ. Elles doivent permettre de décrire plus finement les flux d'eau au travers d'un sol, identique à celui de la plateforme de plein champ. Les six cases permettent de comparer trois des six modalités du dispositif, en se limitant à deux répétitions par traitement (2 cases Témoin, 2 cases BOUE, 2 cases DVB). Ce dispositif permet donc également d'étudier l'effet du compostage avec les traitements BOUE et DVB (figure 4).

Ce dispositif de cases lysimétriques a été mis en place en 1983 par l'équipe Agriculture Durable du centre INRA de Colmar. Les cases, de dimension 2 x 2 m sur 1 m de profondeur, sont situées à 500 m de l'essai de plein champ. Exploitées de 1983 à 2007 pour divers essais, elles ont été placées en homogénéisation en 2008, sans culture.

Un premier épandage de PRO a été effectué en février 2009 au même moment et aux mêmes doses (170 kg N<sub>total</sub>/ha) que l'essai au champ. Les PRO ont été enfouis par un travail superficiel du sol sur 5 cm de profondeur à l'aide d'une griffe.

Un deuxième épandage a été effectué en février 2011, enfoui plus profondément (15 à 20 cm) à l'aide d'un petit motoculteur.



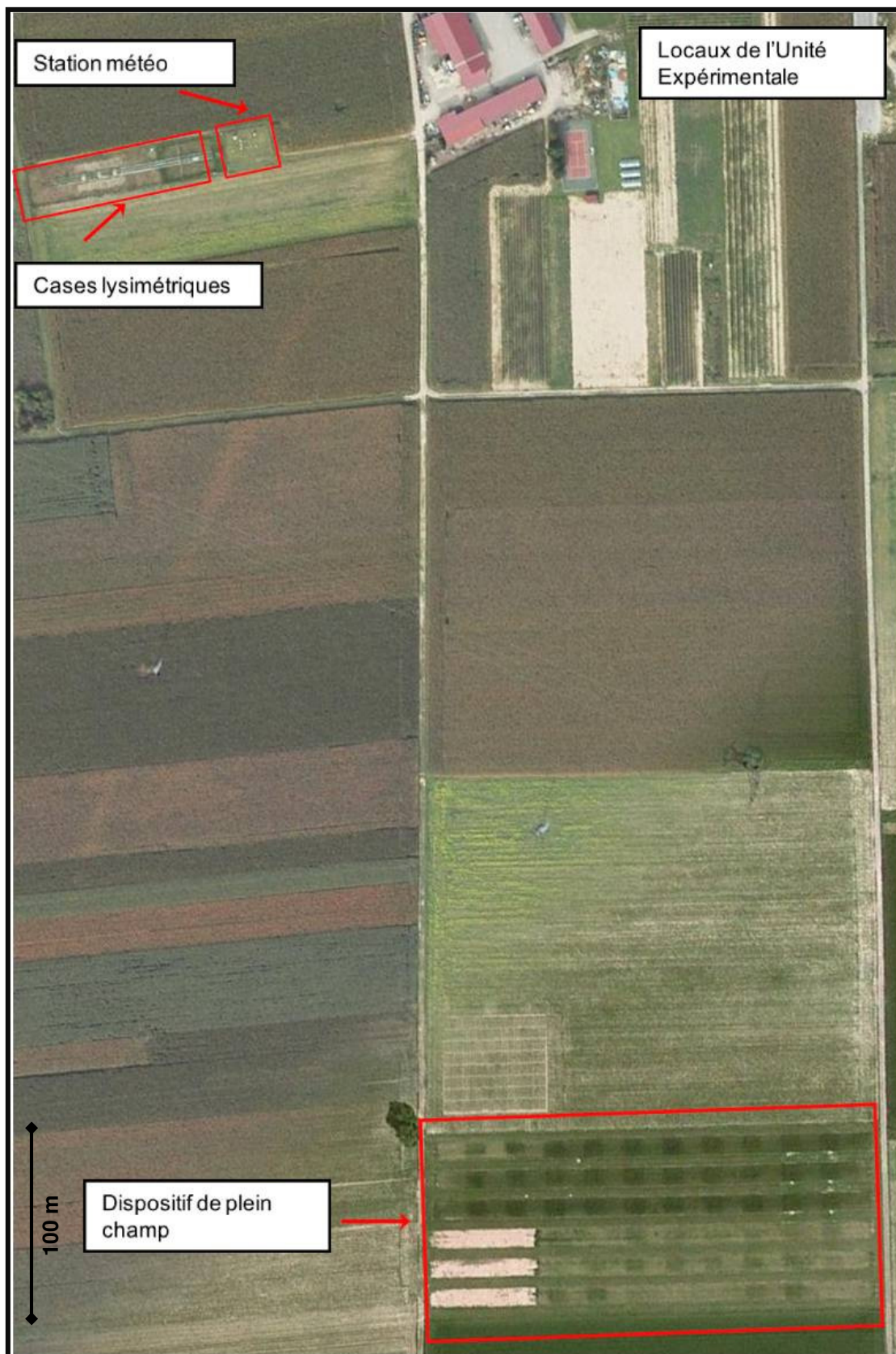


Figure 5 : Photo satellite de l'unité expérimentale de l'INRA de Colmar (24/06/2010) localisant l'essai principal, les cases lysimétriques et la station météorologique

## 1.3 La campagne expérimentale 2011

### 1.3.1 Données climatiques

Les précipitations en 2011 sur le Domaine de l'INRA de Colmar sont de 479 mm (figure 6), inférieures de 60 mm à la moyenne 1986-2010 (537 mm).

Le printemps 2011 est sec. Sur la durée d'implantation de la culture, les précipitations sont de 288 mm, surtout en été ce qui est favorable à la betterave. Les températures en juillet et début août sont plus fraîches que la moyenne 1986-2011 (figure 7).

Le mois de septembre, qui précède la récolte, est très sec et chaud. La sécheresse du sol occasionnera une augmentation de la teneur en sucre des betteraves durant cette période. Les teneurs constatées à la récolte sont en effet particulièrement élevées. 2011 est une année record en Alsace avec un rendement à 16% de sucre de 107,5 T/ha.

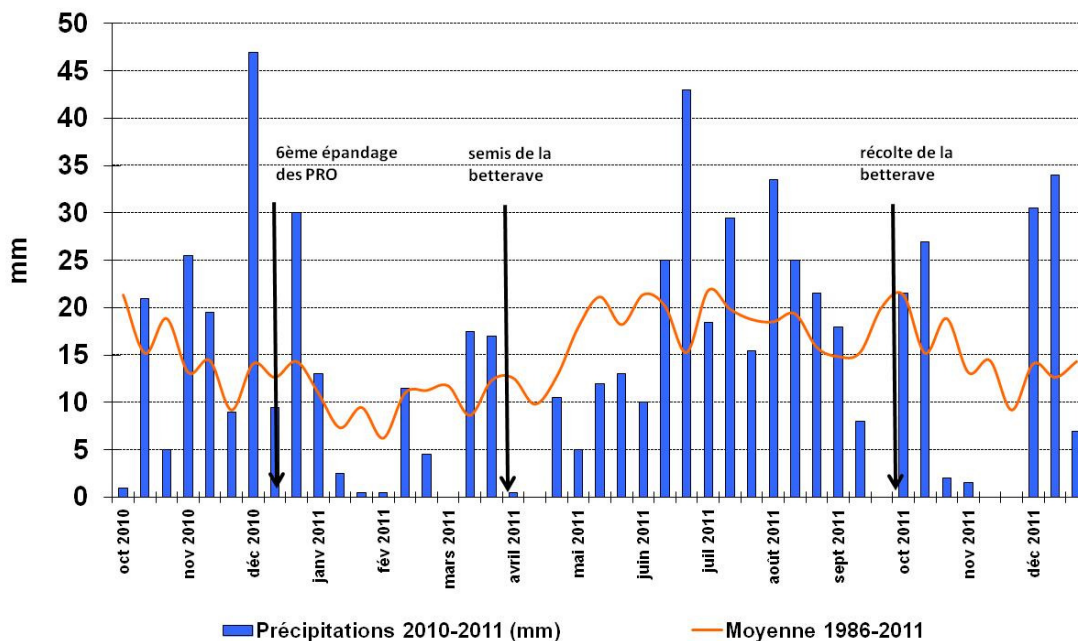


Figure 6 : Précipitations décadaires fin 2010 / 2011 en mm, comparées à la moyenne 1986-2011

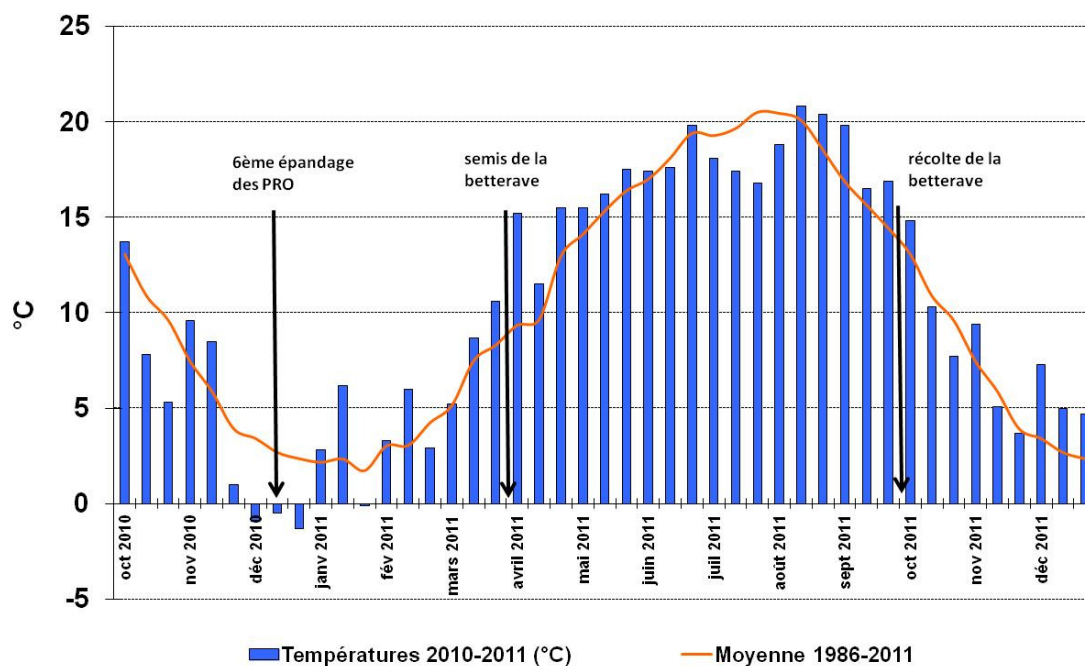


Figure 7 : Températures moyennes décadaires fin 2010 / 2011 en °C, comparées à la moyenne 1986-2011

### 1.3.2 Conduite agronomique de l'essai

L'ensemble des interventions culturales est résumé dans le tableau 2.

#### 1.3.2.1 Fertilisation minérale

Aucune fumure phospho-potassique n'a été appliquée depuis la mise en place de l'essai en 2000 sur les cultures du maïs, du blé et de l'orge. Ces cultures sont en effet peu à moyennement exigeantes en  $P_2O_5$  et  $K_2O$  et le sol de l'essai était initialement bien fourni.

La betterave est une culture à fort niveau d'exigence nécessitant un apport avant le semis, afin d'éviter tout impact négatif sur le rendement de la betterave.

Lors de la première culture de betterave en 2007, un apport a été effectué, de façon homogène sur l'ensemble de l'essai, de 105 U/ha  $P_2O_5$  et 175 U/ha de  $K_2O$  (sous-essai fertilisé et non fertilisé + témoins adjacents).

En 2011, la fumure phospho-potassique est apportée uniquement sur le sous-essai fertilisé. La dose est adaptée pour chaque type de traitement PRO. La fertilisation PK est calculée selon les préconisations du COMIFER qui prend en compte les prévisions de rendement et d'exportation de ces éléments par la culture, les teneurs dans le sol, et le dernier apport de PRO sur les parcelles. Les doses apportées sont indiquées dans le tableau 2.

La fumure phospho-potassique est apportée manuellement le 5/04/2011 au moment de la préparation du sol avant semis sur le sous-essai fertilisé, entre le passage de la herse et le passage de la herse rotative. Elle est enfouie dans le sol par le passage de la herse rotative.

#### 1.3.2.2 Parcelles de bordures

En conditions classiques de production de betteraves, la récolte s'effectue à l'aide d'une arracheuse mécanique qui déplace latéralement d'importantes quantités de terre en surface.

Les contraintes d'expérimentation ont nécessité un arrachage manuel de l'ensemble des plantes de l'essai. Pour réduire le nombre de plantes à arracher en fin de culture, les betteraves semées sur les parcelles de bordure ont été supprimées à la herse après la levée, le 16/05/2011. Afin d'occuper le sol, une culture de phacélie a été implantée sur ces parcelles de bordure, semée le 17/05/2011, puis broyée le 1/09/2011.

#### 1.3.2.3 Protection de la culture

Selon les préconisations de la sucrerie d'Erstein, la culture a fait l'objet de quatre traitements herbicides en avril et mai. Un seul traitement fongicide, effectué en juillet, a été suffisant.

Tableau 2 : résumé de l'itinéraire technique pratiqué sur la betterave et interventions expérimentales en 2011

Date	Intervention	Matériel spécifique	Produit	Dose
24/11/2010	Prélèvements de terre horizon de labour, avant épandage	Bêche		
3/12/2010	Broyage des repousses de blé	Broyeur		
13 et 14/12/2010	Epandage des PRO (6 <sup>ème</sup> épandage) sur l'essai de plein champ	Epandage manuel	BOUE DVB BIO FUM FUMC	2,1 T MS/ha 7,1 T MS/ha 7,8 T MS/ha 5,4 T MS/ha 6,4 T MS/ha
14/12/2010	Labour à 28 cm / Enfouissement des PRO	Charrue 3 socs		
8/02/2011	Epandage et enfouissement des PRO (2 <sup>ème</sup> épandage) sur les cases lysimétriques	Epandage manuel Motoculteur	BOUE DVB	2,2 T MS/ha 7,1 T MS/ha
7 et 8/03/2011	Prélèvements pour reliquats azotés	Préleveur Géonor		
15/03/2011	Préparation du sol	Herse		
1/04/2011	1 <sup>er</sup> apport d'azote minéral sur sous-essai fertilisé	Epandage manuel	Ammonitrate 27%	BOUE : 0 kg N / ha DVB : 0 kg N / ha BIO : 60 kg N / ha FUM : 60 kg N / ha FUMC : 60 kg N / ha Témoin : 80 kg N / ha
4/04/2011	Prélèvement de terre dans les bordures cultivées pour constituer l'échantillon de sol de référence du SOERE PRO au LAS INRA Arras	Bêche		

Date	Intervention	Matériel spécifique	Produit	Dose
5/04/2011	Apport de P minéral sur sous-essai fertilisé	Epandage manuel	Supertriple 45% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BOUE : 0 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / ha DVB : 0 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / ha BIO : 72 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / ha FUM : 0 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / ha FUMC : 26 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / ha Témoin : 166 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / ha
5/04/2011	Apport de K minéral sur sous-essai fertilisé	Epandage manuel	Sulfate de potassium 50% K <sub>2</sub> O	BOUE : 225 kg K <sub>2</sub> O / ha <sup>1</sup> DVB : 120 kg K <sub>2</sub> O / ha <sup>2</sup> BIO : 33 kg K <sub>2</sub> O / ha <sup>3</sup> FUM : 0 kg K <sub>2</sub> O / ha FUMC : 0 kg K <sub>2</sub> O / ha Témoin : 243 kg K <sub>2</sub> O / ha <sup>4</sup>
5/04/2011	Préparation du sol / enfouissement des engrais minéraux	Herse rotative		
5/04/2011	Semis de la betterave	Semoir	Variété Python (SESVanderhave)	125.000 graines / ha
6/04/2011	Traitement herbicide de pré-levée	Pulvérisateur	Mercantor gold (S-metolachlore 960 g/l) Chaptal 700SC (Métamitron 700 g/l) Burex 430 (Chloridazone 430 g/l) Héliosol (Alcools terpeniques 665 g/l)	0,6 l/ha 0,8 l/ha 0,45 l/ha 0,5L/hL Bouillie 200 litres/ha
17/04/2011	Date de levée betteraves			
18/04/2011	Prélèvements de sol 0-20 cm pour suivi microbiologique (plateforme Génosol)	Tarière 5 cm x 20 cm.		

<sup>1</sup> 187 kgK/ha

<sup>2</sup> 100 kgK/ha

<sup>3</sup> 27 kgK/ha

<sup>4</sup> 202 kgK/ha



Date	Intervention	Matériel spécifique	Produit	Dose
27/04/2011	2 <sup>ème</sup> apport d'azote minéral sur sous-essai fertilisé	Epandage manuel	Ammonitrate 27%	BOUE : 0 kg N / ha (apport total 0 kg N / ha) DVB : 42 kg N / ha (apport total 42 kg N / ha) BIO : 40 kg N / ha (apport total 100 kg N / ha) FUM : 27 kg N / ha (apport total 87 kg N / ha) FUMC : 51 kg N / ha (apport total 111 kg N / ha) Témoin : 80 kg N / ha (apport total 160 kg N / ha)
28/04/2011	Traitement herbicide T1	Pulvérisateur	Chaptal 700SC (Métamitronne 700 g/l) LENA (Lenacile 80%) Bétanal booster (Ethofumesate 112 g/l, Phenmédiphame 91 g/l, Desmediphame 71 g/l) Héliosol (Alcools terpeniques 665 g/l)	0,3 l/ha 0,1 kg/ha 1,2 l/ha 0,5 l/hl Bouillie 200 litres/ha
4/05/2011	Traitement herbicide T2	Pulvérisateur	Scenario (Triflusaluron-méthyl 50%) Spectrum (Dimethenamid-p 720 g/l) LENA (Lenacile 80%) Bétanal booster (Ethofumesate 112 g/l, Phenmédiphame 91 g/l, Desmediphame 71 g/l) Héliosol (Alcools terpeniques 665 g/l)	15 g/ha 0,4 l/ha 0,1 kg/ha 1,2 l/ha 0,5 l/hl Bouillie 200 litres/ha
13/05/2011	Traitement herbicide T3	Pulvérisateur	Chaptal 700SC (Métamitronne 700 g/l) Scenario (Triflusaluron-méthyl 50%) Spectrum (Dimethenamid-p 720 g/l) LENA (Lenacile 80%) Bétanal booster (Ethofumesate 112 g/l, Phenmédiphame 91 g/l, Desmediphame 71 g/l) Héliosol (Alcools terpeniques 665 g/l)	0,4l/ha 10 g/ha 0,4 l/ha 0,3 kg/ha 1 l/ha 0,5 l/hl Bouillie 200 litres/ha

Date	Intervention	Matériel spécifique	Produit	Dose
27/06/2011	Traitement herbicide parcelles sols nus	Pulvérisateur	Glyfax (sel d'isopropylamine 360 g/l)	6 l/ha
7/07/2011	Arrachage manuel adventices			
19/07/2011	Traitement fongicide	Pulvérisateur	Spyrale (Difénoconazole 100 g/l, Fenpropidine 375 g/l)	1 l/ha Bouillie 200 litres/ha
9/09/2011	Traitement herbicide parcelles sols nus	Pulvérisateur	Glyfax (sel d'isopropylamine 360 g/l)	6 l/ha
3/10/2011	Récolte manuelle des placettes de betteraves (Betteraves et résidus de récolte)	Fourches à betterave Machettes		
4 au 6/10/2011	Traitement des échantillons de betteraves (râpure)	Parmentière Râpeuse		
4 au 13/10/2011	Retrait des betteraves au champ (hors placettes)	Broyeur mécanique caréné Soc		
18 et 24/10/2011	Prélèvements pour reliquats azotés	Préleveur Géonor		
4/11/2011	Cartographie de résistivité	Outil Géocarta		
8/11/2011	Travail du sol superficiel	Covercrop		
16/11/2011	Cartographie de résistivité (après travail du sol)	Outil Géocarta		
17/11/2011	Labour à 28 cm	Charrue 3 socs		

## 1.4 Présentation de la 6<sup>ème</sup> campagne d'épandage des produits résiduaire organiques

### 1.4.1 Origine des produits résiduaire organiques

**Boue (BOUE) :** Elle provient de la station d'épuration du SITEUCE (Syndicat Intercommunal de Traitement des Eaux Usées de Colmar et Environs). C'est la plus grosse station urbaine du département du Haut-Rhin recyclant ses boues en agriculture (300 000 équivalents habitants). Elle traite les eaux usées de la ville de Colmar, de 40 communes avoisinantes et de quelques industries principalement alimentaires. Les boues sont de type « boues activées par aération prolongée », déshydratées par centrifugation. Ces boues ne sont plus directement recyclées en agriculture.

**Boue compostée (DVB) :** La boue issue du SITEUCE est compostée sur le site SEDE Environnement de Cernay (68). L'andain 5/BC/1041 a été constitué avec les boues de Colmar livrées du 28 au 30/6/10. La phase de fermentation est conduite en aération forcée sans retournement, durant un mois, sous hangar clos (20 minutes d'aération, 15 minutes d'arrêt). Le compost a été criblé le 30/7/2010 et stocké en aire de maturation jusqu'au 16/9/2010, date de son enlèvement. Le mélange a été réalisé avec une mélangeuse MECH, qui travaille par lot de 16 m<sup>3</sup>. La composition moyenne du mélange initial d'un lot est : 3,5 t MB de boues de Colmar, 10 à 11 m<sup>3</sup> de refus de criblage (densité 0,5, humidité 60 à 65%) et 3,5 m<sup>3</sup> de déchets verts broyés (densité 0,35, humidité 55%).

**Compost de biodéchets (BIO) :** le compost de biodéchet, ou fraction fermentescible d'ordures ménagères, provient d'une plate-forme de compostage VEOLIA Propreté située à Caudan dans le Morbihan (56). Les biodéchets sont collectés sélectivement et compostés en mélange avec des déchets verts. La phase de fermentation est effectuée en aération forcée pendant 30 jours. La phase de maturation débute avec une ventilation (aspiration) pendant 3 semaines, puis un criblage à 15 mm et une poursuite de la maturation pendant 2 mois.

**Fumier (FUM) :** C'est un fumier de vaches laitières provenant d'une exploitation alsacienne. Les vaches, de type Prim'Holstein, sont en stabulation avec litière accumulée et reçoivent 8 à 9 kg de paille par jour et par vache. La vidange du fumier, âgé de 8 semaines a été effectuée le 5/11/2010.

**Fumier composté (FUMC) :** Le fumier, de la même origine que le précédent, est composté à l'air libre sur plate-forme bétonnée avec récupération des jus. Le fumier utilisé, âgé de 6 semaines, a été enlevé sur l'exploitation le 30/09/2010. Le compostage, effectué par le SEAV de l'INRA Colmar, dure 2 mois, avec quatre retournements (7/10, 20/10, 3/11 et 30/11/2010).

### 1.4.2 Mise en œuvre du chantier d'épandage

L'épandage des PRO, depuis le début de l'expérimentation, était habituellement effectué aux mois de janvier ou février des années impaires, avant l'implantation de la culture de printemps (maïs ou betterave). Afin d'assurer une bonne évolution du labour réalisé pour l'enfouissement des PRO, en profitant des périodes de gel hivernal, il a été décidé d'avancer la date d'épandage d'environ deux mois, soit à la fin de l'année précédente. L'épandage a donc été effectué les 13 et 14 décembre 2010, l'année culturale de référence utilisée pour la présentation des résultats restant l'année 2011.

Le dispositif expérimental dispose d'une dérogation permettant l'épandage de la boue d'épuration, classée fertilisant de type II, avant la date réglementaire du 15 janvier.

L'épandage des PRO est mis en œuvre conformément au protocole n° 14. Les masses à épandre au champ ont été calculées d'après les analyses des teneurs en matière sèche et N total, réalisées sur les PRO avant leur épandage. Elles respectent l'arrêté pris en application de la Directive Nitrates pour la plaine d'Alsace (170 kg N<sub>total</sub> /ha) et la réglementation sur les épandages de boue (flux maximal de 30 T MS / ha / 10 ans, tableau 1).

L'épandage a été réalisé manuellement, sur sol sec en surface, avec une température moyenne de -3°C. Les quantités parcellaires à apporter sont fractionnées en parts égales dans 4 à 16 bacs de 100 L selon la densité du produit, puis réparties sur les quartiles de chaque parcelle et étalées à la fourche ou à la pelle. Les épandages sur l'ensemble des parcelles sont effectués en deux jours, les PRO étant enfouis par labour (0-28 cm) à la fin du deuxième jour.

### 1.4.3 Analyses sur les PRO

Le prélèvement des échantillons destinés aux analyses (tableau 3) est effectué au cours des pesées précédant l'épandage. Au moins 12 échantillons élémentaires de chaque produit sont prélevés périodiquement, transvasés et homogénéisés pour réaliser ces échantillons composites, conditionnés en sac plastique et stockés à 4-5 °C, jusqu'à leur transfert aux différents laboratoires pour analyse (tableau 6).

Tableau 3 : échantillons et analyses sur les PRO

Nombre d'échantillons	Analyses	Laboratoires
3	analyses physico-chimiques	LAS Arras
3	fractionnement biochimique de la MO et calcul de ISMO	LDAR Laon
1	incubations carbone et azote	LDAR Laon
1	séchage 40°C et stockage dans l'échantillonthèque	SADEF Aspach

### 1.5 Suivi de la qualité des sols

Les prélèvements et échantillons de terre des horizons de surface (sur 0-28 cm, correspondant à la profondeur de labour) de 54 parcelles de l'essai (48 parcelles du dispositif central + 6 parcelles en sols nus) ont été réalisés le 24 novembre 2010, selon le protocole n° 9, avant le 6<sup>ème</sup> épandage des PRO. Le sol n'a pas été travaillé depuis la récolte de blé au mois de juillet. L'échantillon moyen parcellaire est issu de 10 prélèvements élémentaires effectués à la bêche dans l'horizon 0-28 cm et envoyé frais au laboratoire pour analyse des éléments majeurs uniquement (tableau 6).

### 1.6 Mesures et analyses sur les produits récoltés

La culture de betterave sucrière est suivie et récoltée selon le protocole n° 3.

#### 1.6.1 Mesures de la production de betterave

Des mesures sont effectuées sur chaque parcelle expérimentale, en cours de culture et à la récolte (tableau 4), sur 3 placettes de dimension 7 m x 1 rang (espacement entre rangs de 50 cm) soit une surface de récolte par parcelle de 10,5 m<sup>2</sup> (figure 8). Les variables de production calculées sont issues de ces données.

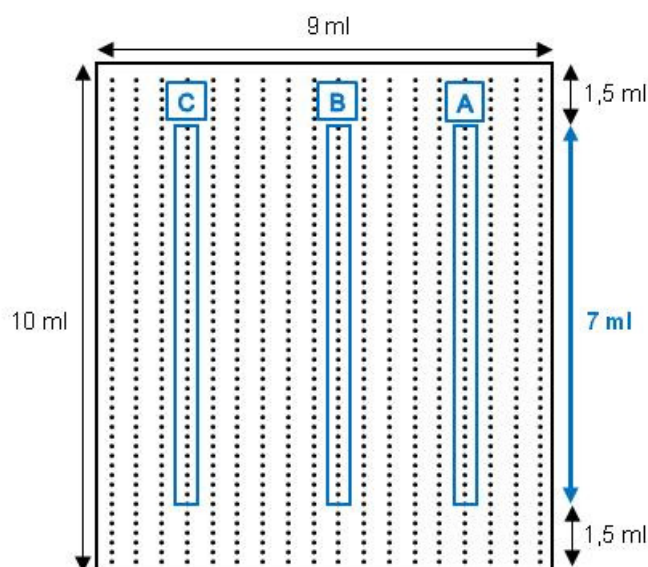


Figure 8 : Schéma d'une parcelle expérimentale et des 3 placettes étudiées et récoltées

Outre les informations sur la productivité, la connaissance des biomasses permet le calcul des flux d'éléments exportés par les betteraves ou stockés dans les parties aériennes résiduelles restituées au sol.

**Tableau 4** : Variables mesurées intervenant dans l'étude de la productivité de la betterave en 2011

	Récolte manuelle
Surface	10,5 m <sup>2</sup> (sur 3 placettes de 7 m x 1 rang)
Outils	fourche à betterave, machette
Mesures ou analyses laboratoires	peuplement plantes à la levée peuplement plantes à la récolte poids frais betteraves teneur matière sèche betteraves richesse en sucre extractible poids frais résidus de récolte teneur matière sèche résidus de récolte
Variables calculées	rendement betteraves net frais en T/ha biomasse sèche betteraves en T / ha rendement à 16% de sucre en T/ha rendement sucre en T/ha biomasse fraîche résidus de récolte en T/ha biomasse sèche résidus de récolte en T/ha

### 1.6.2 Analyse des récoltes

Les concentrations dans les parties exportées (betteraves) et les résidus de récolte (bouquets foliaires) retournant au champ sont analysées à partir des échantillons récoltés manuellement.

Les bouquets foliaires sont séchés et broyés pour être analysés. Les échantillons de betteraves subissent le procédé de traitement suivant (figure 9) :

- pesée poids brut au retour du champ + comptage peuplement récolte
- décolletage au massicot
- lavage en parmentière et pesée poids net
- découpe à la râpeuse (scies circulaires) pour obtenir de la pulpe
- conditionnement et congélation immédiate de la pulpe qui sera analysée

Les analyses réalisées en 2011 sur la récolte de betterave sont détaillées dans le tableau 5. Hormis le suivi des éléments majeurs et traces réalisé par le laboratoire INRA USRAVE, le taux de richesse en sucre des betteraves (valeur technologique) est analysé par le Service Agronomique de la société Cristal Union.

**Tableau 5** : Analyses réalisées sur les échantillons de betterave en 2011

	Betteraves		Résidus de récolte	
	Avec engrais minéral	Sans engrais minéral	Avec engrais minéral	Sans engrais minéral
Éléments majeurs totaux	X	X	X	X
Éléments traces totaux	X		X	
Richesse en sucre	X	X		

Le protocole de préparation d'échantillon et d'analyse des betteraves défini après avoir été testé pour la campagne de 2007 a été appliqué.

Il comporte les étapes suivantes : séchage de l'échantillon à 50°C, broyage, prise d'essais, minéralisation par calcination avec reprise des cendres aux acides nitrique et fluorhydrique et analyse par spectrométrie. Ce protocole permet l'analyse des éléments majeurs (Al, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn) et traces (Cd, Pb, Co, Cr, Mo, Ni, As) respectivement par ICP-OES et ICP-MS.

Les échantillons de pulpe de betterave (partie exportée) ont eu un comportement inhabituel au moment du séchage à 50°C. Les échantillons, au lieu d'être friables, comme pour la campagne de 2007, étaient, après séchage, particulièrement durs. Le broyage a été difficile et a eu pour conséquence la pollution des échantillons en Cr, Ni, Fe, Co et Mo.

De nouveaux échantillons de pulpe congelée ont été transmis au laboratoire. L'homogénéisation de ce nouvel échantillon n'a pas été possible et un sous-échantillonnage a été fait directement sur la pulpe congelée. Une méthode alternative de mise en solution de l'échantillon permettant de travailler directement sur la pulpe fraîche a été employée. Cette méthode préparation/analyse a permis d'évaluer les concentrations en Cr, Ni, Fe, Co et Mo.

En raison du sous-échantillonnage, la mesure de la teneur en matière sèche n'a pu être réalisée correctement. Les résultats présentés dans ce rapport en 2.4 pour les éléments Cr, Ni, Fe, Co et Mo sur betteraves du sous-essai complété en engrais minéral sont donc issus de l'analyse sur la pulpe fraîche avec une correction de la teneur en MS. Les résultats présentés ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

En partie 2.4, nous proposons de nouvelles modalités de préparation et minéralisation des échantillons en vue de la prochaine campagne de betterave.

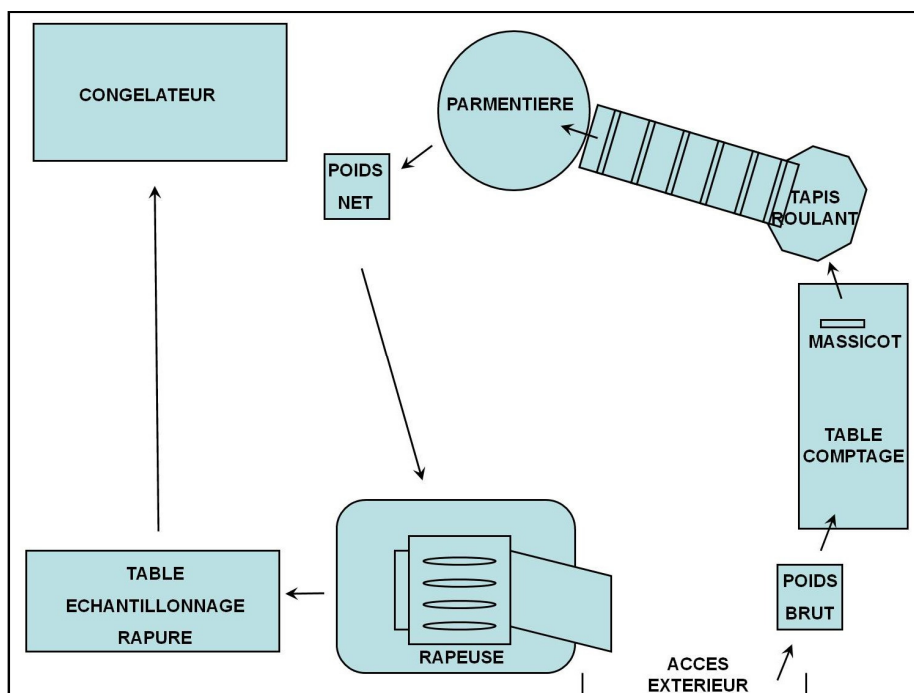


Figure 9 : schéma de la salle de traitement des échantillons de betterave

## 1.7 Suivi de l'azote minéral des sols cultivés

L'analyse des teneurs en N minéral des sols est poursuivie en 2011 sur l'ensemble des parcelles cultivées selon le protocole n°7 (horizons 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm). Deux campagnes de prélèvements ont été réalisées, en mars 2011 pour les reliquats sortie d'hiver et le calcul de la fertilisation, et en octobre 2011 après la récolte de la betterave.

## 1.8 Suivi de la qualité de eaux de pluie

Les précipitations atmosphériques humides sont recueillies par le pluviomètre réfrigéré, échantillonnées chaque semaine, conditionnées et immédiatement congelées (protocole n°18). Les échantillons sont mélangés au laboratoire par trimestre, en respectant la représentativité du volume de précipitations hebdomadaires, permettant de calculer des flux de polluants. Les analyses portent sur les teneurs en éléments majeurs ainsi qu'en ETM.

## 1.9 Analyse des résultats : outils et méthodes statistiques

Les analyses graphiques sont effectuées avec Excel 2007.

Les analyses statistiques sont effectuées avec Statbox 6.3. Un risque de 1<sup>ère</sup> espèce  $\alpha$  de 5% est retenu comme seuil de signification en analyse de variance ainsi que pour le calcul de puissance des tests :

- **analyse de variance à un facteur** (dispositif bloc) : dans les sous-essais avec et sans engrais, le facteur étudié est le facteur « PRO » (randomisation dans les blocs) ; la comparaison des moyennes est faite avec le test de Newman & Keuls (classement des traitements en groupes homogènes) et le test de Dunnett (comparaison deux à deux au témoin sans apport) ;

- **analyse de variance à deux facteurs imbriqués** (dispositif split-plot) : le facteur 1 est le facteur « engrais », le facteur 2 est le facteur « PRO » ; la comparaison des moyennes est faite avec le test de Newman & Keuls.

Le test de Newman-Keuls est une procédure de comparaisons multiple qui permet de comparer toutes les paires de moyennes et d'établir des groupes homogènes. Ainsi deux modalités appartenant au même groupe ne sont pas significativement différentes, et deux modalités appartenant à des groupes différents sont significativement différentes. Les groupes homogènes sont représentés par des lettres (a, b, c, ...).

Le test de Dunnett est employé pour comparer les différentes modalités avec le témoin et définir celles qui sont significativement différentes de ce témoin. Le résultat du test de Dunnett est affiché sous la forme : modalité significativement supérieure (> T) ou inférieure (< T) au témoin.

Des données initiales suspectes ou manquantes peuvent éventuellement faire l'objet d'une estimation par la formule de Yates. Les valeurs moyennes présentées dans les tableaux et figures intègrent ces corrections.

## 1.10 Laboratoires partenaires impliqués pour les analyses physiques et chimiques des différentes matrices analysées

Les différentes analyses réalisées au cours de la campagne 2011 ainsi que les laboratoires sollicités sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : analyses physiques et chimiques et laboratoires sollicités

Matrices	Paramètres mesurés	Fréquence	Laboratoires et unités
Sols	Eléments majeurs <sup>(1)</sup>	Tous les 2 ans avant épandage	Laboratoire d'Analyse des Sols INRA Arras (62)
	Eléments traces totaux et extractibles <sup>(2)</sup> HAP <sup>(3)</sup> , PCB <sup>(4)</sup>	Tous les 4 ans avant épandage	
	N minéral	3 fois par an	SADEF Aspach (68)
Produits résiduels organiques	Eléments majeurs <sup>(1)</sup> , éléments traces totaux et extractibles <sup>(2)</sup> HAP <sup>(3)</sup> , PCB <sup>(4)</sup>	A chaque épandage	Laboratoire d'Analyse des Sols INRA Arras (62)
	Fractionnement biochimique de MO		LDAR Laon (02)
	incubations C et N		LDAR Laon (02)
Végétaux	Mesures en végétation Rendements et biomasses	En cours de culture et à la récolte	Unité Expérimentale Agronomique et Viticole INRA Colmar (68)
	MS, éléments majeurs <sup>(1)</sup> , éléments traces totaux <sup>(2)</sup>	A la récolte	USRAVE INRA Bordeaux (33)
	Richesse en sucre	A la récolte	Service Agronomique Cristal Union (10)
Eau du sol	Nitrates	Tous les 2 mois	SADEF Aspach (68)
Précipitations atmosphériques humides	Éléments majeurs <sup>(1)</sup> , éléments traces totaux <sup>(2)</sup>	Prélèvements quotidiens regroupés par trimestre	Laboratoire d'Analyse des Sols INRA Arras (62)

(1) Teneurs en matière organique, N, P, K, Ca, Mg, Na  
+ pour sols et PRO : pH ; pour sols : capacité d'échange cationique

(2) Éléments traces totaux : Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, Co, Mo, Tl, Ag, Hg, As, Se, B  
Éléments traces extractibles :  
EDTA (BCR) : Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn  
CaCl<sub>2</sub> : Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Mn  
B eau bouillante

(3) HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) : Naphtalène, Acénaphtène, Fluorène, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Indéno(123 cd)pyrène, Phénanthrène, Anthracène, Pyrène, Benzo(a)anthracène, Chrysène, Benzo(k)fluoranthène, Dibenz(a,h)anthracène, Benzo(ghi)pérylène, Acénaphtylène

(4) PCB (Polychlorobiphényles): 18, 28, 33, 52, 44, 70, 101, 118, 153, 105, 138, 187, 128, 180, 170, 194, 195, 199, 206, 209



## 2. PRINCIPAUX RESULTATS

### 2.1 Évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'horizon labouré

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées au LAS, sur les échantillons prélevés le 24/11/2010, sont présentés dans les tableaux 8 et 9.

#### 2.1.1 Carbone organique

Les teneurs en carbone organique dans l'horizon labouré (0-28 cm) ne sont pas significativement différentes entre les deux sous-essais, avec des moyennes de 14,1 g/kg pour la partie sans complémentation minérale et 14,6 g/kg pour la partie avec complémentation.

Dans chacun des deux sous-essais, les teneurs dans les traitements PRO semblent se distinguer du témoin mais ces différences ne sont pas statistiquement significatives (tableaux 8 et 9, figures 10 et 11).

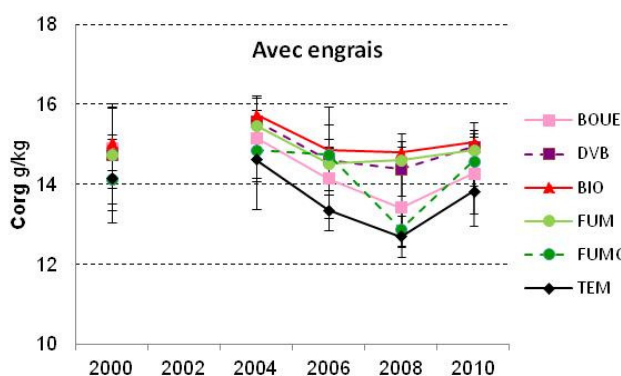


Figure 10 : évolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon labouré de 2000 à 2010 (en g/kg), sous-essai avec engrais

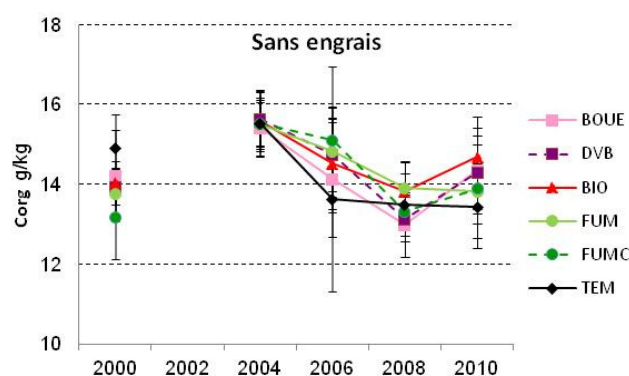


Figure 11 : évolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon labouré de 2000 à 2010 (en g/kg), sous-essai sans engrais

Il convient de rappeler que les flux de carbone apportés par les PRO en 5 épandages sont bien inférieurs à ceux générés durant la même période par les résidus de culture laissés au champ après récolte (figure 12). Les flux sont de 5 T C/ha pour la Boue à 15 T C/ha pour le fumier, et compris entre 30 et 40 T C/ha pour les résidus de récolte. La discrimination des traitements due à la différence d'entrée de carbone par l'intermédiaire des PRO est ainsi difficile à appréhender.

Une comparaison des teneurs moyennes en carbone organique dans les parcelles cultivées et les parcelles maintenues en sols nus depuis le début de l'expérimentation montre cet effet significatif des résidus de récolte (figure 13). En 2000, après une culture d'homogénéisation sur l'ensemble de l'essai, les teneurs sont similaires sur toutes les parcelles. L'évolution jusqu'en 2010 est la même entre les deux sous-essais cultivés. En 2010, le sous-essai avec complémentation minérale, qui génère plus de résidus de récolte, présente des teneurs en carbone organique légèrement supérieures à celles du sous-essai non complétementé. La courbe des teneurs des parcelles en sols nus se dissocie dès 2004 (pas d'analyse en 2002) pour aboutir en 2010 à des valeurs 20 % plus faibles que dans les parcelles cultivées.

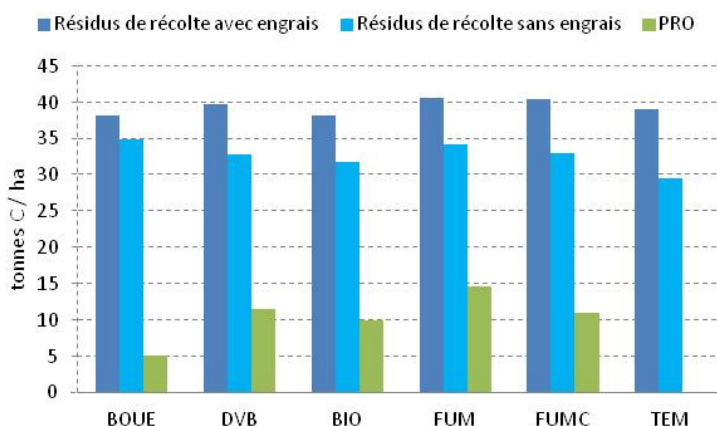


Figure 12 : comparaison du total des apports de carbone via les résidus de récolte sur la période 2000 à 2010, et via les PRO (épandus en 2001, 2003, 2005, 2007 et 2009), en tonnes de C/ha

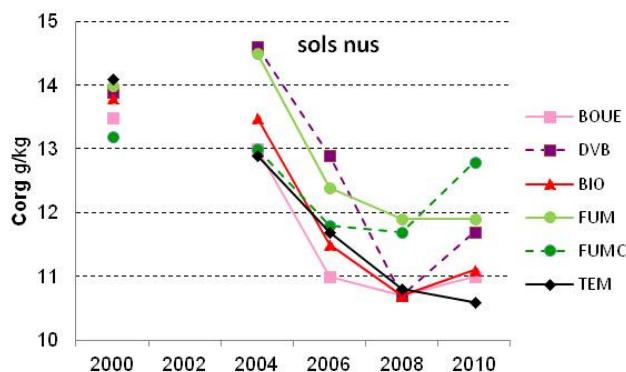
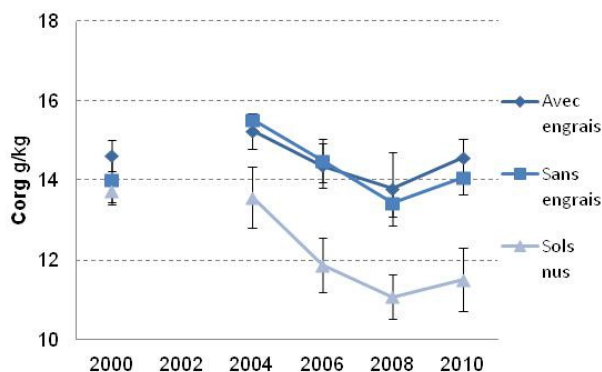


Figure 13 : comparaison de l'évolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, sans engrais et dans les parcelles en sols nus, en g C<sub>org</sub>/kg (moyenne des 6 modalités)

Figure 14 : évolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon labouré de 2000 à 2010 (en g/kg), parcelles maintenues en sols nus depuis 2001.

Sur le dispositif de parcelles en sol nu (figure 14), il semble que les traitements PRO augmentent la teneur en Corg par rapport au témoin, en particulier les traitements fumiers et DVB. Ces observations devront être confirmées, et validées statistiquement, lors des prochaines campagnes, par des répétitions de la mesure au sein de chaque parcelle.

### 2.1.2 Autres paramètres agronomiques

Lorsque l'on compare les moyennes des traitements entre les deux sous-essais, la capacité d'échange cationique et les teneurs en calcium échangeable sont significativement supérieures dans le sous-essai avec complémentation minérale par rapport au sous-essai sans complémentation (tableau 7). Ces différences avaient déjà été constatées au début de l'expérimentation.

Les teneurs en potassium échangeable ainsi qu'en phosphore Olsen sont significativement supérieures dans le sous-essai sans complémentation minérale.

Tableau 7 : résultats statistiques significatifs entre les 2 sous-essais sur la CEC, les cations échangeables et le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Olsen dans l'horizon labouré

	Avec engrais minéral	analyse de variance	Sans engrais minéral
<b>CEC</b>	16,7 cmol+/kg	> Proba 0,04 - CV 3,86% - puissance 91%	16,1 cmol+/kg
<b>Ca</b>	3,34 g/kg	> Proba 0,008 - CV 2,5% - puissance 99%	3,2 g/kg
<b>K</b>	0,247 g/kg	< Proba 0,023 - CV 6,8% - puissance 95%	0,268 g/kg
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Olsen</b>	0,052 g/kg	< Proba 0,019 - CV 14% - puissance 97%	0,062 g/kg

Les teneurs mesurées et les résultats des analyses statistiques pour les deux sous-essais sont présentés dans les tableaux 8 et 9. L'évolution des teneurs en éléments majeurs depuis l'état initial en 2000, avec des mesures effectuées tous les deux ans sur l'horizon labouré dans les deux sous-essais, sont présentées sur les figures 15 à 30.

Dans les deux sous-essais, l'analyse statistique fait ressortir des différences significatives pour les valeurs de pH, les traitements BOUE et DVB présentant les pH les plus bas. Ces différences restent minimes étant donné qu'elles prennent en compte deux décimales et que l'ensemble des valeurs est compris entre 8,37 et 8,45. Cependant cette éventuelle tendance devra être considérée lors des prochaines mesures.

Dans le sous-essai complétement en engrais minéral, les teneurs en N total sont significativement supérieures au témoin et au traitement BOUE dans les traitements BIO, DVB et FUM. Dans le traitement BIO, elles sont également supérieures à celles du traitement FUMC.

Dans le sous-essai complétement en engrais, la **capacité d'échange cationique (CEC)** est significativement supérieure au témoin dans les traitements DVB et BIO. Ces traitements présentent également les teneurs en carbone organique les plus élevées, qui pourraient avoir un effet sur l'évolution de la CEC.

Dans le sous-essai complétement en engrais, les teneurs en **K** échangeable dans les traitements BIO, FUM et FUMC sont significativement supérieures à celles observées dans les traitements témoin, BOUE et DVB, avec le classement des concentrations suivant : FUM > FUMC > BIO > DVB = Témoin = BOUE. Dans le sous-essai sans complémentation, les valeurs de concentrations se classent de la manière suivante : FUM = FUMC > BIO > DVB > Témoin > BOUE. Ces observations sont parfaitement corrélées avec les flux de potassium apportés par les PRO.

Dans le sous-essai avec complémentation, les teneurs en **Mg** échangeable dans les traitements FUM et FUMC sont significativement supérieures aux autres traitements et se classent dans l'ordre FUM = FUMC > DVB ≥ BIO = BOUE ≥ Témoin. Dans le sous-essai sans complémentation, les valeurs de concentrations se classent de la manière suivante : FUM = FUMC > DVB > BIO ≥ BOUE ≥ Témoin. Ces observations sont également corrélées avec les flux de magnésium apportés par les PRO.

Dans le sous-essai avec complémentation, les teneurs en **Ca** échangeable des traitements DVB, BIO et BOUE sont significativement supérieures à celles des autres traitements. Dans le sous-essai sans complémentation, les différences sont moins marquées et seul le traitement DVB présente des teneurs significativement supérieures aux traitements FUM et FUMC.

Dans le sous-essai sans complémentation, les teneurs en **Na** échangeable dans les traitements FUMC et BIO sont significativement supérieures à celles des traitements BOUE et témoin.

Dans les deux sous-essais, les teneurs en **P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Olsen** sont significativement supérieures au témoin dans tous les traitements PRO, et sont supérieures aux autres traitements dans les traitements BOUE et DVB. Ces observations sont également bien corrélées avec les flux de phosphore apportés par les PRO.

Comme cela avait été observé dès 2008, l'évolution des teneurs en éléments nutritifs, dans l'horizon labouré, sur une période de 10 ans et 5 épandages, démontre la valeur agronomique des PRO, puisqu'ils augmentent les quantités disponibles pour les cultures.

Ainsi les apports en potassium générés par FUM, FUMC et dans une moindre mesure par BIO, dans le cadre d'épandages respectant la réglementation, permettent de remplacer des engrais potassiques, en maintenant voire en augmentant les teneurs dans les sols.

De même, les apports en phosphore générés par BOUE et DVB, permettent de remplacer des engrais phosphatés. Les traitements FUM, FUMC et BIO, aux doses épandues, améliorent les teneurs en phosphore par rapport au témoin, mais n'empêchent pas un appauvrissement à long-terme.

Tableau 8 : Paramètres agronomiques des horizons de surface des sols au 24/11/2010 (0-28 cm) : moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) avec complémentation minérale ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes. Résultats exprimés par rapport à un sol séché à l'air.

	pH eau		C org.		MO		N total		C/N		CEC		Bases échangeables (g/kg)						P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen							
	-		g/kg										-		cmol+ / kg		K		Mg		Ca		Na		g/kg	
	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
<b>BOUE</b>	8,38	0,02	14,3	0,4	24,7	0,7	1,31	0,01	10,8	0,2	16,7	0,2	0,185	0,019	0,11	0,007	3,37	0,02	0,0058	0,0009	0,074	0,005				
	bc <T												c		ab		d		bc		a		a >T			
<b>DVB</b>	8,37	0,02	15	0,4	25,9	0,8	1,42	0,02	10,6	0,1	17,1	0,2	0,216	0,013	0,118	0,004	3,41	0,03	0,0055	0,0002	0,07	0,009				
	c <T												ab >T		a >T		d		b >T		a >T		a >T			
<b>BIO</b>	8,42	0,02	15,1	0,5	26,1	0,8	1,43	0,02	10,6	0,3	17	0,2	0,243	0,023	0,112	0,003	3,39	0,04	0,0067	0,0004	0,04	0,003				
	ab												a >T		a >T		c >T		bc		a >T		c			
<b>FUM</b>	8,39	0,03	14,9	0,4	25,6	0,6	1,41	0,03	10,6	0,2	16,8	0,4	0,335	0,013	0,133	0,007	3,28	0,06	0,0066	0,0011	0,055	0,002				
	bc												ab >T		ab		a >T		a >T		b		b >T			
<b>FUMC</b>	8,43	0,00	14,6	0,6	25,3	1,1	1,36	0,05	10,8	0,1	16,6	0,2	0,307	0,023	0,127	0,002	3,27	0,02	0,006	0,0003	0,043	0,005				
	a												bc		ab		b >T		a >T		b		c >T			
<b>TEM (T)</b>	8,43	0,03	13,8	0,9	23,9	1,4	1,3	0,06	10,7	0,6	16,3	0,2	0,197	0,009	0,106	0,005	3,31	0,04	0,0059	0,0006	0,03	0,005				
	a												c		b		d		c		b		d			

<b>Probabilité</b> ( $\alpha = 5\%$ )	<b>0,00258</b>	0,07	0,06	<b>0,00019</b>	0,77	<b>0,005</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,00018</b>	0,084	<b>0</b>
<b>CV (%)</b>	0,26 %	3,99 %	3,87 %	2,5 %	2,85 %	1,43 %	7,13 %	3,96 %	1,11 %	9,65 %	10,5 %
<b>Puissance</b> ( $\alpha = 5\%$ )	92 %	66 %	68 %	98 %	15 %	89 %	99 %	99 %	98 %	63 %	99 %

Tableau 9 : Paramètres agronomiques des horizons de surface des sols au 24/11/2010 (0-28 cm) : moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) sans complémentation minérale ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes. Résultats exprimés par rapport à un sol séché à l'air.

	pH eau		C org.		MO		N total		C/N		CEC		Bases échangeables (g/kg)				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen											
	-		g/kg										-		cmol+ / kg		K		Mg		Ca		Na		g/kg			
	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET		
<b>BOUE</b>	8,38	0,01	14,4	1,3	24,8	2,3	1,33	0,05	10,8	0,7	16,1	0,3	0,199	0,005	0,108	0,003	3,24	0,08	0,0048	0,0005	0,08	0,008						
	<b>b &lt;T</b>												<b>e</b>		<b>cd</b>		<b>ab</b>		<b>b</b>		<b>b &gt;T</b>							
<b>DVB</b>	8,39	0,03	14,3	0,9	24,7	1,6	1,38	0,07	10,4	0,4	16,3	0,7	0,238	0,004	0,117	0,006	3,27	0,12	0,0052	0,0008	0,087	0,005						
	<b>b &lt;T</b>												<b>c &gt;T</b>		<b>b &gt;T</b>		<b>a</b>		<b>ab</b>		<b>a &gt;T</b>							
<b>BIO</b>	8,44	0,02	14,7	0,7	25,4	1,3	1,38	0,03	10,7	0,4	16,1	0,2	0,267	0,015	0,112	0,004	3,22	0,03	0,0065	0,0005	0,051	0,003						
	<b>a</b>												<b>b &gt;T</b>		<b>c &gt;T</b>		<b>ab</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>c &gt;T</b>							
<b>FUM</b>	8,42	0,02	13,8	1,2	23,9	2	1,35	0,07	10,2	0,5	16	0,4	0,346	0,016	0,13	0,003	3,12	0,06	0,0061	0,0003	0,054	0,003						
	<b>a</b>												<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>b</b>		<b>ab</b>		<b>c &gt;T</b>							
<b>FUMC</b>	8,45	0,01	13,9	0,6	24,1	1,1	1,33	0,04	10,5	0,3	16	0,5	0,344	0,015	0,129	0,003	3,11	0,06	0,0066	0,0006	0,057	0,003						
	<b>a</b>												<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>b</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>c &gt;T</b>							
<b>TEM (T)</b>	8,44	0,03	13,5	1	23,3	1,8	1,29	0,06	10,4	0,5	16,1	0,3	0,215	0,012	0,106	0,004	3,24	0,03	0,0047	0,0012	0,043	0,002						
	<b>a</b>												<b>d</b>		<b>d</b>		<b>ab</b>		<b>b</b>		<b>d</b>							

<b>Probabilité</b> ( $\alpha = 5\%$ )	<b>0,00053</b>	0,61	0,62	0,146	0,72	0,56	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,016</b>	<b>0,005</b>	<b>0</b>
<b>CV (%)</b>	0,23 %	7,43 %	7,4 %	3,73 %	4,83 %	1,71 %	3,5 %	2,39 %	2,08 %	13,08 %	6,15 %
<b>Puissance</b> ( $\alpha = 5\%$ )	97 %	20 %	20 %	56 %	16 %	22 %	99 %	99 %	81 %	89 %	99 %

**Avec complémentation minérale**

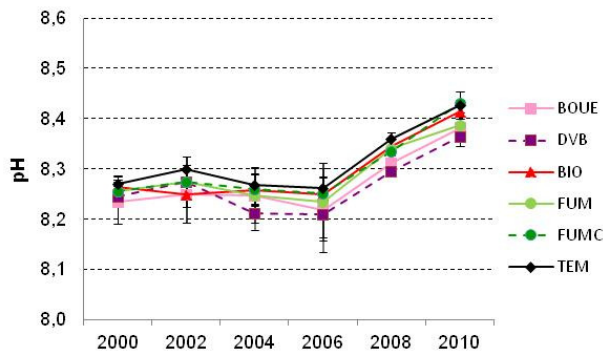


Figure 15 : Évolution du **pH** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais

**Sans complémentation minérale**

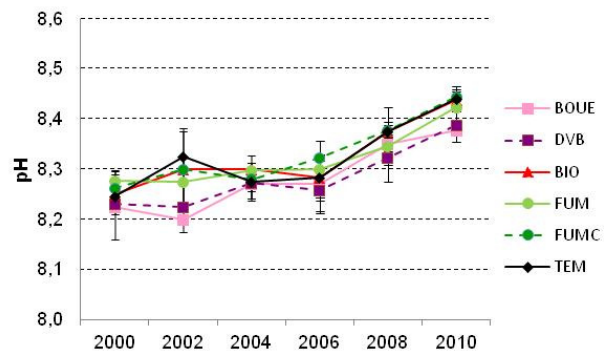


Figure 16 : Évolution du **pH** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais

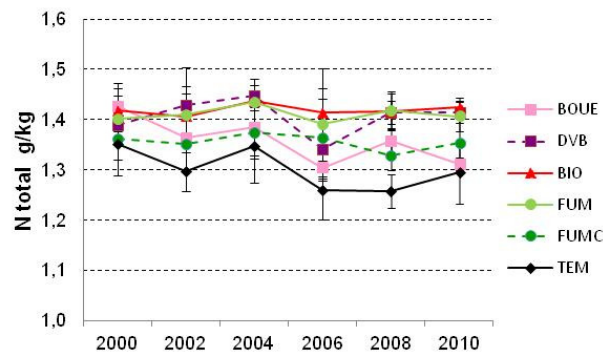


Figure 17 : Évolution des teneurs en **azote total (N)** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en g/kg

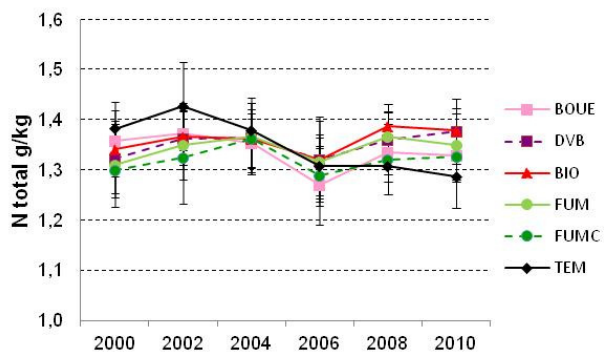


Figure 18 : Évolution des teneurs en **azote total (N)** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en g/kg

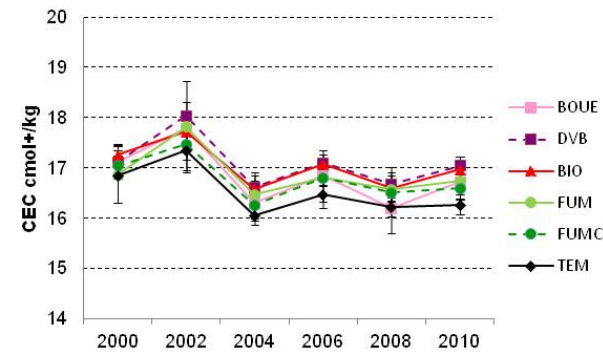


Figure 19 : Évolution de la **CEC** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en cmol+/kg

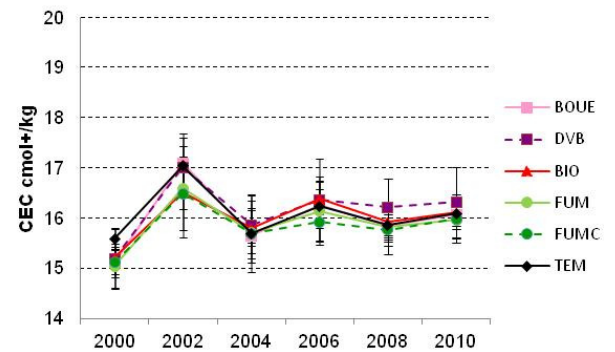


Figure 20 : Évolution de la **CEC** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en cmol+/kg

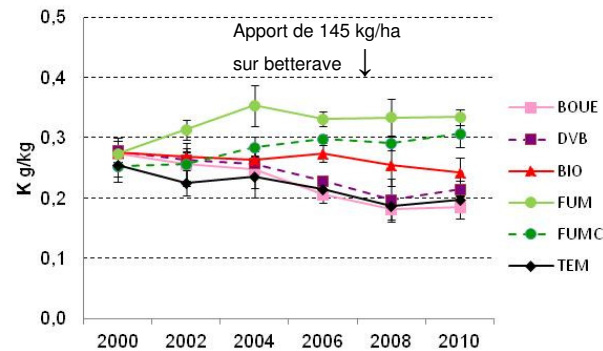


Figure 21 : Évolution des teneurs en **potassium (K) échangeable** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en g/kg

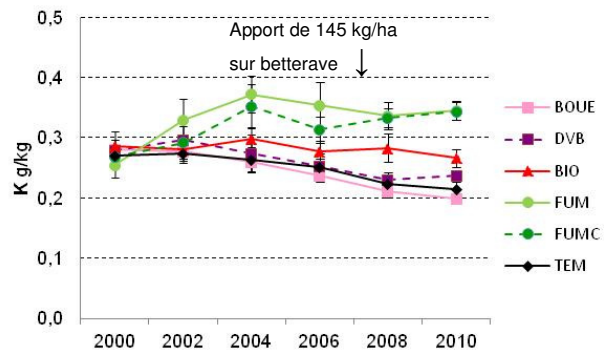


Figure 22 : Évolution des teneurs en **potassium (K) échangeable** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en g/kg

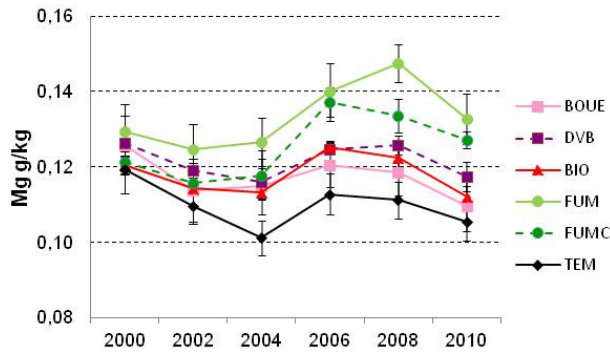


Figure 23 : Évolution des teneurs en **magnésium (Mg)** échangeable dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en g/kg

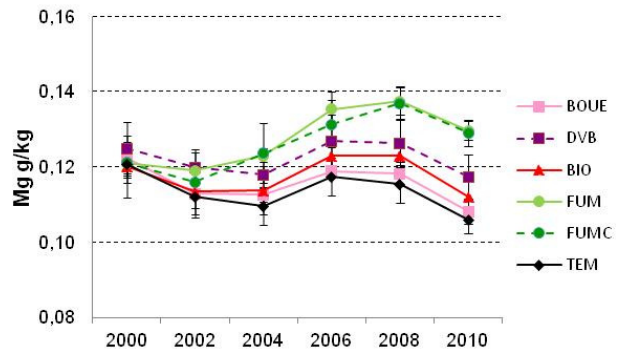


Figure 24 : Évolution des teneurs en **magnésium (Mg)** échangeable dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en g/kg

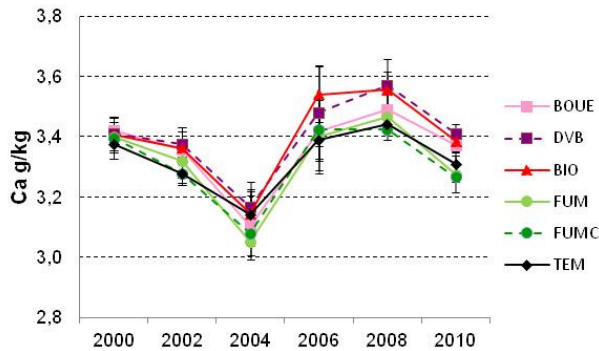


Figure 25 : Évolution des teneurs en **calcium (Ca)** échangeable dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en g/kg

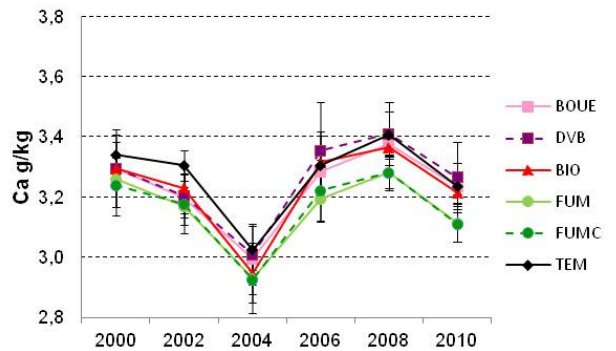


Figure 26 : Évolution des teneurs en **calcium (Ca)** échangeable dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en g/kg

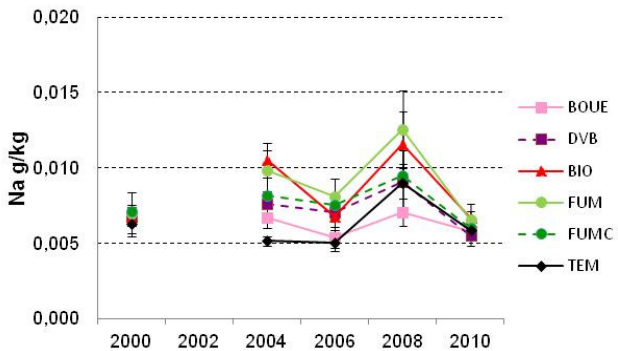


Figure 27 : Évolution des teneurs en **sodium (Na)** échangeable dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en g/kg (laboratoire différent en 2002)

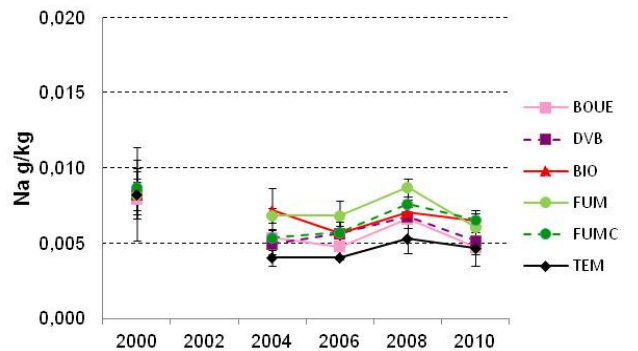


Figure 28 : Évolution des teneurs en **sodium (Na)** échangeable dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en g/kg (laboratoire différent en 2002)

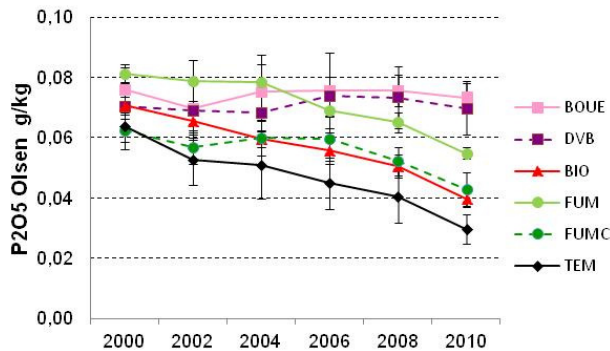


Figure 29 : Évolution des teneurs en **phosphore Olsen (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées avec engrais, en g/kg

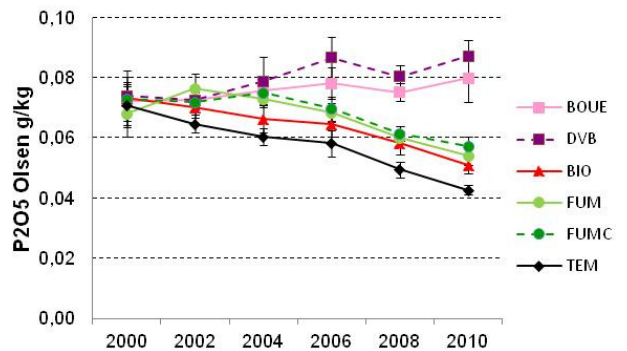


Figure 30 : Évolution des teneurs en **phosphore Olsen (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)** dans l'horizon labouré de 2000 à 2010, dans les parcelles cultivées sans engrais, en g/kg

## 2.2 Caractéristiques des produits résiduels organiques épandus en 2011

Le 6<sup>ème</sup> épandage de produits résiduels organiques a eu lieu les 13 et 14 décembre 2010, avant la culture de betterave. Comme cela a été précisé en 1.4.2, il a été décidé d'avancer la date d'épandage des PRO d'environ deux mois par rapport aux années précédentes, afin d'assurer une bonne évolution du labour réalisé pour l'enfouissement des PRO, avant l'implantation de la culture de betteraves.

L'année culturale de référence utilisée pour la présentation des résultats des analyses de PRO reste l'année 2011.

A partir des analyses des PRO réalisées avant l'épandage, un calcul des masses à épandre a été effectué, basé sur un apport de 170 kg d'azote total par hectare (tableau 1).

### 2.2.1 Caractéristiques physico-chimiques des produits résiduels organiques

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées au LAS sur les échantillons de produits frais effectivement épandus sont présentés dans les tableaux 11 à 14.

#### 2.2.1.1 Matière organique

Les teneurs en matière organique sont les plus élevées pour FUM et BOUE (75 et 70 % MS), DVB ayant les teneurs les plus faibles avec 45 % (figure 31). Comme cela a été constaté depuis 2005, les teneurs en matière organique de DVB baissent régulièrement (figure 32), évolution due aux modifications du process (co-substrat de déchets verts employé, durée de maturation, ouverture de la maille de crible). Ces évolutions du process et leurs impacts sur les teneurs en matière organique du DVB seront étudiées sur la base des informations obtenues auprès de la station de compostage. Les teneurs en matière organique de BIO ont tendance à augmenter et sont, pour la première fois en 2011, légèrement supérieures à celles de DVB.

Les teneurs en MO des fumiers sont en légère diminution, probablement suite au changement d'exploitation opéré en 2011. En effet les apports de pailles sur l'exploitation sont de 8 à 9 kg par jour et par vache, alors qu'ils étaient d'environ 12 kg dans le fumier utilisé en 2009.

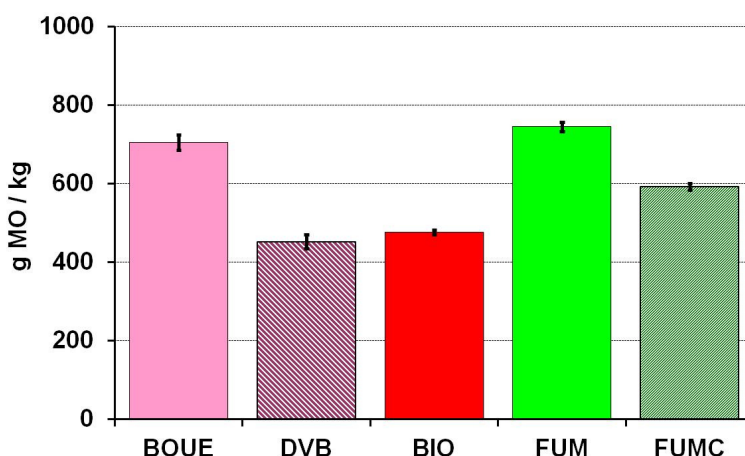


Figure 31 : Teneur en matière organique des PRO en 2011, en g/kg MS



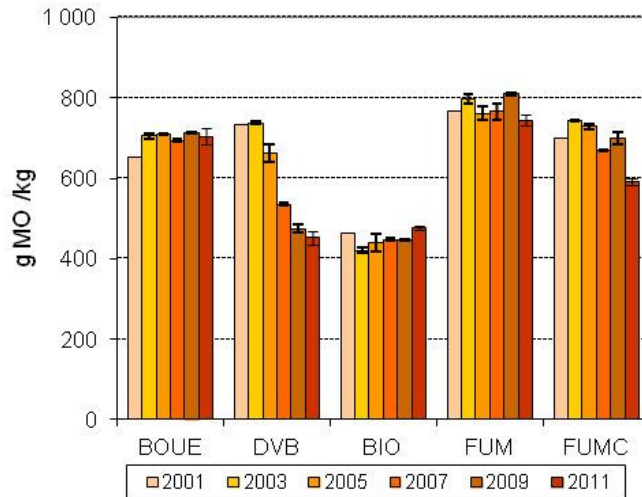


Figure 32 : Évolution des teneurs en matière organique des PRO de 2001 à 2011, en g/kg MS

Les matières organiques des PRO sont caractérisées selon les 2 normes expérimentales XP U 44-162 et XP U 44-163. Ces 2 normes permettent d'évaluer en laboratoire les effets des PRO à moyen/long termes sur la matière organique du sol, sur les potentialités de stockage du carbone apporté par les épandages (XPU 44-162) et à plus court terme sur l'activité biologique du sol et la disponibilité de l'azote des produits épandus (XPU44-163, minéralisation C et N au cours d'incubations au laboratoire).

L'indice ISB, précédemment utilisé pour caractériser la stabilité de la matière organique, s'avérait obsolète au regard de la multiplicité des produits organiques mis sur le marché. Une étude financée par l'ADEME (convention 0475C0078 - Résumé Echo-MO n° 64 de mars-avril 2007) a abouti à la proposition d'un nouvel indice appelé **ISMO** (Indicateur de stabilité de la matière organique) qui représente la proportion de C organique s'incorporant à long-terme à la MO du sol. La norme expérimentale XP U 44-162 de « Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique » (ISMO) a été publiée par l'AFNOR en décembre 2009, et est parue le 14 janvier 2010.

Cet indice est exprimé en % de la MO du produit et est égal à  $44,5 + 0,5 \cdot \text{SOL} - 0,2 \cdot \text{CEL} + 0,7 \cdot \text{LIC} - 2,3 \cdot \text{Cm3}$

- SOL, CEL et LIC sont les fractions organiques ("soluble", "cellulose" et "lignine + cutine") telles que définies dans la méthode de fractionnement biochimique (ISB/TrCBM XPU 44-162) et exprimées en % MO du produit (figure 33).
- Cm3 est la proportion de carbone du produit minéralisée après 3 jours d'incubation, exprimée en % du C organique du produit.

Sur les 5 PRO épandus, l'indice ISMO permet de différencier les 3 composts (DVB, BIO et FUMC) des BOUE et FUM, et rend ainsi mieux compte de l'augmentation de la stabilité de la matière organique après le processus de compostage. DVB a l'ISMO le plus élevé avec 72 % de matière organique stable (figure 34). Les ISMO de DVB et BIO sont cependant en baisse par rapport à 2009 (-7 à 8 %), en revanche les indices de BOUE et FUM sont en augmentation (+ 8 à 9 %), ce qui indique une plus grande stabilité de ces PRO et réduit l'écart entre PRO compostés ou non.

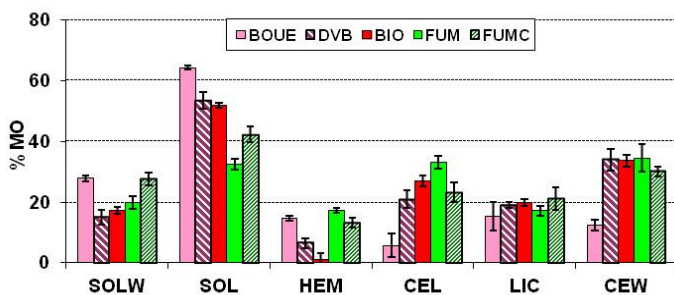


Figure 33 : Fractionnement biochimique de la matière organique des PRO en 2011

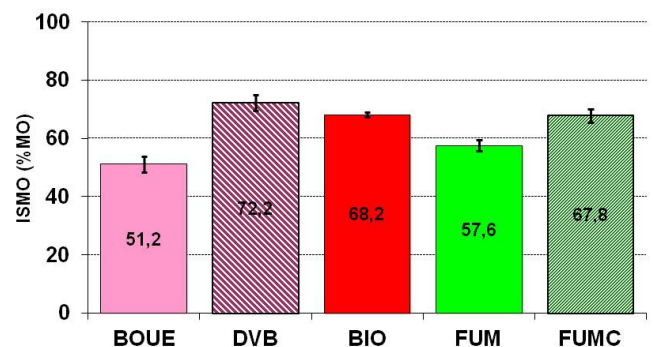


Figure 34 : Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO) des PRO en 2011

### 2.2.1.2 Cinétiques de minéralisation carbone et azote

Ces études de laboratoire permettent de suivre les dynamiques de minéralisation de l'azote et du carbone contenus dans les PRO. Dans les conditions de température et d'humidité contrôlées et pour les conditions expérimentales utilisées (incorporation intime du produit séché et broyé à 1 mm, dans un type de sol donné échantillonné à 4 mm, quantité d'azote minéral disponible définie), on approche une valeur "potentielle" de minéralisation de ces produits organiques. Ce processus simule, en 91 jours au laboratoire, une année de dégradation au champ.

Un test comparatif a été entrepris en 2011 dans le but de déterminer l'influence du type de sol sur la minéralisation des PRO étudiés. Deux séries d'incubations pour l'étude des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote ont été effectuées par le laboratoire LDAR de Laon :

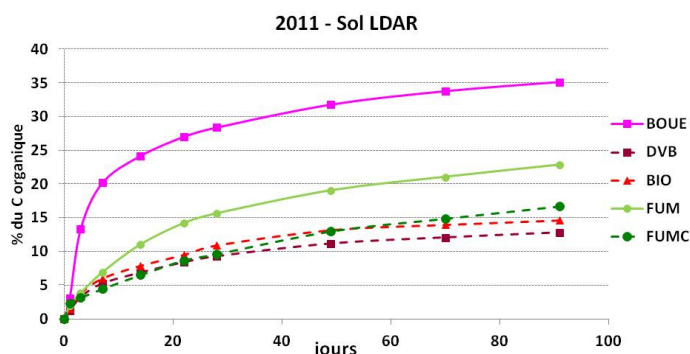
- Une série d'incubation des cinq PRO en utilisant le sol standard du LDAR
- Une série d'incubation des cinq PRO en utilisant le sol de l'essai de Colmar

Les caractéristiques physico-chimiques des échantillons des deux sols utilisés pour ces tests sont présentées dans le tableau 10.

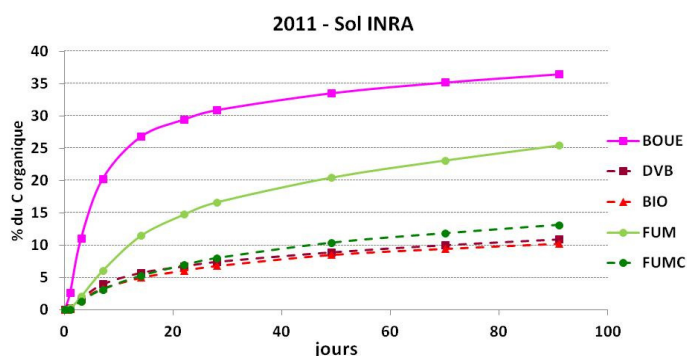
**Tableau 10** : caractéristiques physico-chimiques des échantillons des sols utilisés pour le test comparatif (sol du LDAR et sol de l'essai PRO de l'INRA Colmar)

		Sols utilisés	
		SOL LDAR	SOL ESSAI PRO COLMAR
Argile	(en g/ kg sol sec)	163	164
Limon fin		273	284
Limon grossier		376	350
Sable fin		116	47
Sable grossier		72	32
Calcaire total		0	124
Carbone organique		7,9	11,2
Azote total		0,9	1,18
Capacité de rétention en eau pF 2.5		235	201
pH eau		6,4	8,5
Rapport C/N		8,8	9,5
Humidité (g/kg sol brut)		27	21
Azote minéral (mg/ kg de sol sec)		15,92	4,46

- Cinétiques de minéralisation du carbone organique



**Figure 35** : Cinétiques de minéralisation du C organique des PRO en 2011 au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire (28 °C) de mélanges « sol du LDAR + PRO », en % du C organique des PRO



**Figure 36** : Cinétiques de minéralisation du C organique des PRO en 2011 au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire (28 °C) de mélanges « sol de Colmar + PRO », en % du C organique des PRO

Les produits étudiés ont le même comportement sur les deux sols (sols LDAR et sol INRA). On peut noter trois catégories de produits (figures 35 et 36) :

- Le produit BOUE avec une minéralisation du carbone assez rapide. Pour ce PRO, on note une première phase de minéralisation assez rapide puis une stabilisation. En fin de période d'incubation, un peu plus du tiers du carbone organique du produit est minéralisé (35% sur le sol LDAR et 36% sur le sol INRA). Le taux de minéralisation est inférieur à ceux constatés lors des épandages précédents (40% en 2005 et 2007, 45% en 2009). Cette observation est confirmée par l'augmentation de l'indice ISMO de BOUE.
- La minéralisation du carbone du produit FUM est assez lente et son taux de minéralisation intermédiaire. Pour ce PRO, près du quart du carbone organique est minéralisé après 91 jours d'incubation (23% sur le sol LDAR et 25% sur le sol INRA). Ce fumier, issu d'une nouvelle exploitation en 2011, est plus stable que celui épandu en 2007 et 2009 qui atteignaient un taux de minéralisation du carbone de 38 % en fin d'incubation. Cette observation est également confirmée par l'augmentation de l'indice ISMO de FUM.
- Les trois PRO compostés, DVB, BIO et FUMC, ont une minéralisation faible. Selon les PRO et types de sol, le taux de minéralisation du carbone après 91 jours d'incubation est compris entre 10 et 17%. Le processus de minéralisation de FUMC est plutôt moindre par rapport à ce qui avait été observé les années précédentes.
- Cinétiques de minéralisation de l'azote organique

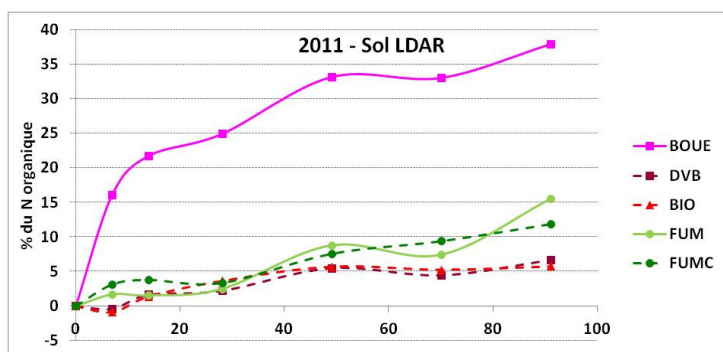


Figure 37 : Cinétiques d'évolution du N minéral des PRO en 2011 au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire (28 °C) de mélanges "sol du LDAR + PRO", en % du N organique des PRO

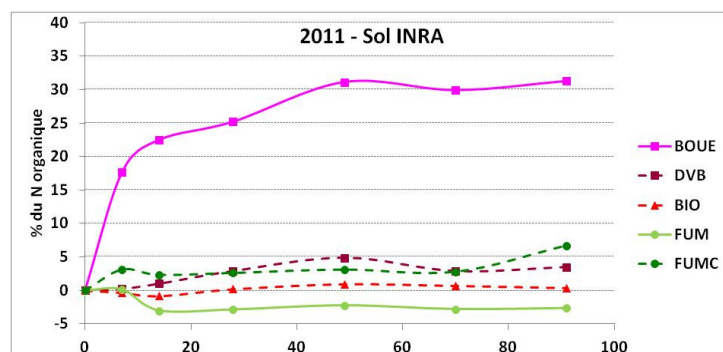


Figure 38 : Cinétiques d'évolution du N minéral des PRO en 2011 au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire (28 °C) de mélanges "sol de Colmar + PRO", en % du N organique des PRO

Concernant la minéralisation de l'azote, les PRO ont un comportement similaire sur les deux sols, excepté pour FUM (figures 37 et 38). On note un taux de minéralisation de l'azote légèrement supérieur sur le sol LDAR. Il est possible que la présence de carbonates dans le sol INRA entraîne un ralentissement sur la minéralisation des produits apportés. On observe deux catégories de produits :

- Le produit BOUE présente une minéralisation assez rapide de l'azote puis une stabilisation à partir du 49e jour d'incubation. Après 91 jours d'incubation, entre 30 et 40 % de l'azote organique du produit est minéralisé, ce qui correspond aux taux de minéralisation observés en 2007 et 2009.
- Pour les trois composts DVB, BIO et FUMC, on note une très faible minéralisation de l'azote entre 0 et 12%. Ce sont des cinétiques de minéralisation de l'azote généralement observées pour ce type de PRO.
- Le produit FUM présente, quant à lui, des résultats différents selon le sol étudié. Sur le sol LDAR, il y a minéralisation de l'azote dès l'apport du produit : après 91 jours d'incubation, le taux de minéralisation de l'azote est de 16%. Au contraire, pour ce même PRO mis en incubation sur le sol INRA, ce taux de minéralisation est légèrement négatif sur toute la période d'incubation, il y a donc immobilisation du N minéral.

Les quantités de carbone et d'azote restant (non minéralisées) vont rejoindre le pool de matière organique du sol.

### 2.2.1.3 Eléments majeurs, éléments traces et composés traces organiques

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées au LAS sur les échantillons de produits frais effectivement épandus en 2011 sont présentés dans les tableaux 11 à 14.

Les évolutions des caractéristiques physico-chimiques des PRO épandus de 2001 à 2011 sont présentées sur les figures 39 à 66.

**BOUE** présente en 2011 une concentration en N total similaire aux épandages précédents. Elle contient un peu moins de N minéral qu'en 2005, 2007 et 2009 (18 g/kg).

La boue est le produit dont les concentrations en N total, N minéral et  $P_2O_5$  sont les plus élevées. Comme lors des épandages précédents, ses teneurs en K, Mg et Ca sont plus faibles que dans les autres PRO.

Les concentrations en ETM totaux sont toutes conformes à la réglementation en vigueur. Les teneurs sont en baisse depuis le début de l'essai pour Ag, Cd et Ni. Après une tendance à la hausse lors des épandages précédents, les teneurs en Pb et Zn sont inférieures à celles de 2007 et 2009. Les teneurs en Al, Cr, Mo et As se stabilisent. Par contre, les teneurs en Co sont en très forte augmentation en 2011, ainsi que dans une moindre mesure les concentrations en Cu et Hg (par rapport à 2007 et 2009). C'est le PRO qui contient le plus de Se (extraction eau régale), auparavant inférieur aux limites de quantification du laboratoire.

Après une augmentation en 2009, il y a une tendance à une forte baisse pour tous les HAP dont les teneurs sont supérieures aux limites de quantification, notamment ceux visés par la réglementation (fluoranthène, benzo (b) fluoranthène, benzo (a) pyrène).

Après une forte augmentation des teneurs en PCB dans BOUE en 2009 (les plus élevées depuis 2001), elles sont toutes en baisse en 2011, avec une somme des 7 PCB visés par la réglementation la plus faible depuis le début de l'expérimentation.

**DVB** présente des teneurs en N total stables et en augmentation pour N minéral. Les concentrations en  $P_2O_5$ , Ca et Mg sont en augmentation.

Après avoir observé en 2007 une tendance à l'amélioration de la qualité de DVB en termes de teneurs en éléments traces, une augmentation avait été constatée en 2009 pour un certain nombre d'éléments. Cette dégradation de la qualité de DVB se confirme en 2011. Les teneurs en Fe, Al, Mn et As ont toujours tendance à augmenter depuis le début de l'essai. Les teneurs sont en hausse pour Cd (par rapport à 2007 et 2009), Cr, Ni, Pb et Zn et en forte augmentation pour Co. Les teneurs en Zn (576 mg/kg) sont très proches de la limite fixée par la norme NFU 44-095 pour ce type de compost à 600 mg/kg. Seules les concentrations en Ag sont en baisse, les teneurs en Cu, Mo et Hg étant stables.

Pour les HAP, les teneurs sont en moyenne stables par rapport aux épandages précédents. Elles sont en baisse pour fluoranthène et chrysène. Cependant, avec l'amélioration de la qualité de BOUE et BIO, DVB est le PRO dont les concentrations en HAP sont les plus élevées. C'est le cas pour les trois composés visés par la réglementation (fluoranthène, benzo (b) fluoranthène, benzo (a) pyrène). Il est également le seul PRO dont les teneurs en fluorène sont supérieures à la limite de quantification.

Pour les PCB, le constat est le même que pour BOUE avec une nette amélioration des teneurs en 2011 par rapport au pic constaté en 2009. Les concentrations dans DVB sont du même ordre de grandeur et mêmes supérieures à celles de BOUE pour plus de la moitié des PCB, sans phénomène de « dilution » lié au compostage. La somme des 7 PCB est en effet égale à celle de BOUE et du même ordre de grandeur que lors des épandages précédents hormis 2009.

**BIO** présente des teneurs en azote total et minéral en constante augmentation. Il est issu de la même plateforme de compostage qu'en 2009. Ses teneurs en  $P_2O_5$  sont un peu plus élevées mais en légère diminution pour K et Mg. Les concentrations en  $CaCO_3$  sont toujours deux fois moindres que celles observées jusqu'en 2007. C'est le cas contraire pour Na, dont les teneurs ont doublé en 2009 et 2011.

De manière générale pour les concentrations en ETM de BIO, il y a encore amélioration de la qualité du produit constatée depuis 2009 suite au changement de plateforme de compostage. Les teneurs sont stables pour Ag, Al, Cu, Pb, Zn, et As. Elles sont en baisse constante pour Fe, Mn, Cd, Cr, Mo, Ni.

Les teneurs en Hg ont tendance à augmenter mais c'est surtout la concentration en Co qui, comme pour tous les autres PRO sauf FUM, est en forte augmentation.

Pour les HAP, la qualité est assez similaire au compost de biodéchets épandus en 2009. Les concentrations sont plutôt en baisse pour fluoranthène, benzo (b) fluoranthène, benzo (a) pyrène et pyrène, et stables pour benzo (a) anthracène et benzo (k) fluoranthène. Il y a une légère augmentation des teneurs pour phénanthrène.

Les teneurs en PCB de BIO restent en moyenne plus élevées par rapport à 2007 où le produit était issu d'une autre plateforme de compostage. C'est le cas pour les PCB 52, 44, 70, 101, 118, 153, 105, 187, 180, 199, 206, ainsi que pour la somme des 7 PCB visés par la réglementation. Les teneurs sont stables pour les PCB 18, 28, 138, 128, 170, seules les teneurs du PCB 195 étant en diminution par rapport à 2007. Le produit BIO présente néanmoins des teneurs en PCB deux fois moindres que celles de DVB.

**FUM et FUMC** présentent des teneurs en  $P_2O_5$  plus élevées que lors des épandages précédents, ainsi qu'en K après une baisse en 2009. FUM contient 3 à 4 fois plus de N minéral que les teneurs communément observées. Les concentrations en Ca, et en particulier en Na sont en hausse dans les fumiers de 2011.

Les concentrations en ETM sont plus élevées en 2011 dans les fumiers, avec des augmentations significatives, pour les éléments Cr, Cu, Ni, Zn, Hg et B. Les teneurs en Al et Fe sont en baisse dans FUM mais en hausse dans le compost. Les teneurs en Ag sont en baisse, et elles sont stables pour Mo et Cd.

Comme lors des épandages précédents, les concentrations en HAP sont inférieures à la limite de quantification dans FUM et FUMC. Un incident s'était produit lors du compostage du fumier utilisé pour l'épandage précédent en 2009 : l'engin servant au retournement avait provoqué une contamination en HAP, générant des teneurs dans FUMC supérieures aux PRO d'origine urbaine.

La recherche de PCB dans les fumiers présente quelques résultats supérieurs aux limites de quantification (PCB 28, 52, 44, 70, 101, 118, 153, 138). Ces teneurs restent très inférieures à celles des PRO d'origine urbaine.

Tableau 11 : Analyses agronomiques des produits épandus les 13 et 14/12/2010, moyenne et écart-type sur 3 échantillons. Échantillons séchés, broyés et analysés au LAS INRA Arras

	<b>MS</b>	<b>pH</b> eau	<b>MO</b>	<b>C<sub>orga</sub></b>	<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>C/N</b>	<b>N-NH<sub>4</sub></b>	<b>N-NO<sub>3</sub></b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> Olsen	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Mo</b> CEE9.1
	%MB		%MS	g / kg MS			g / kg MS <sup>a</sup>		g / kg MS							mg / kg MS
<b>BOUE</b>	17	8,5	70,5	385	59,5	6,5	17,9	0,0057	8,1	66,5	4,91	6,9	17,6	4	2,22	2
	0,2	0,06	2	9	0,6	0,17	0,5	0,002	1,3	1	0,02	0,6	0,3	0,03	0,53	0,06
<b>DVB</b>	66,3	8,4	45,2	234	25,7	9,1	6,1	0,049	43,7	40,5	0,84	14,3	46,4	6,01	4,63	0,4
	0,9	0,02	1,7	9	0,3	0,3	0,1	0,03	2,4	0,2	0,02	0,2	1,7	0,1	0,2	0,1
<b>BIO</b>	83,2	8,7	47,7	251	23,3	10,8	1,5	0,019	50,4	12,3	0,47	22,4	46,2	3,93	8	0,1
	1,5	0,01	0,6	3	0,5	0,3	0,1	0,003	0,8	0,5	0,01	0,1	0,5	0,08	0,14	0
<b>FUM</b>	19,2	8,8	74,5	384	26,9	14,3	3,7	0,345	25,8	22,1	6,48	46,7	17,1	8,9	5,9	0,5
	0,2	0,15	1,2	5	1,3	0,9	2,3	0,274	2,8	1,2	0,21	3,5	0,5	0,4	0,4	0,06
<b>FUMC</b>	22,2	8,8	59,2	301	24,7	12,2	0,2	0,116	58,2	22,1	4	44,6	34,3	11,27	10,03	0,5
	0,5	0,03	0,8	10	0,8	0,04	0,005	0,01	5,5	0,5	0,1	1,4	1,6	0,49	0,21	0,1

<sup>a</sup> Analyses réalisées sur produit frais, pour éviter les pertes au séchage, résultats exprimés sur la matière sèche

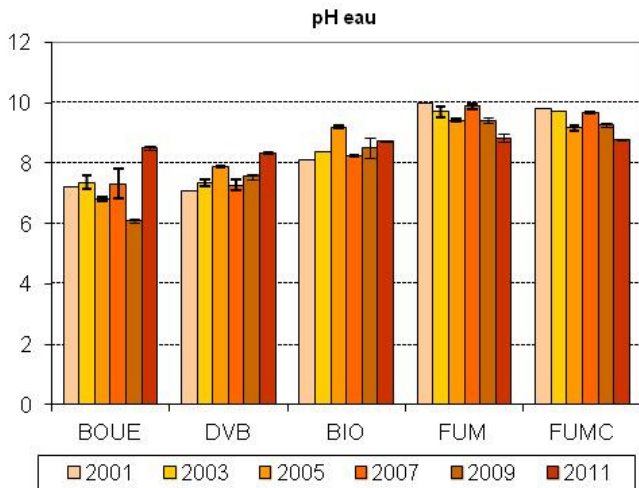


Figure 39 : Évolution des pH des PRO épandus de 2001 à 2011

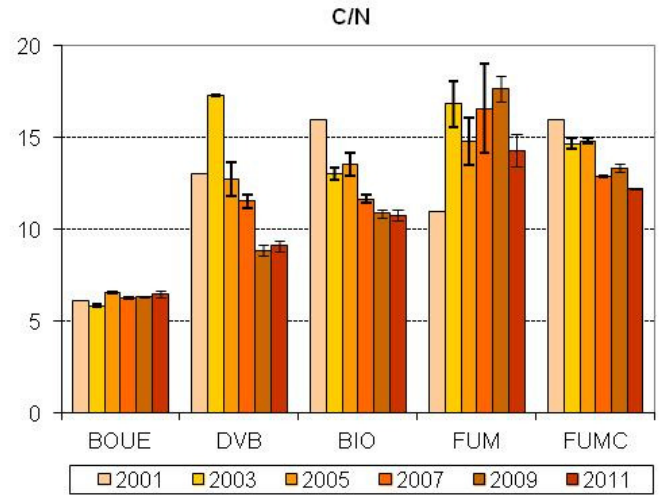


Figure 40 : Évolution des rapports C/N des PRO épandus de 2001 à 2011

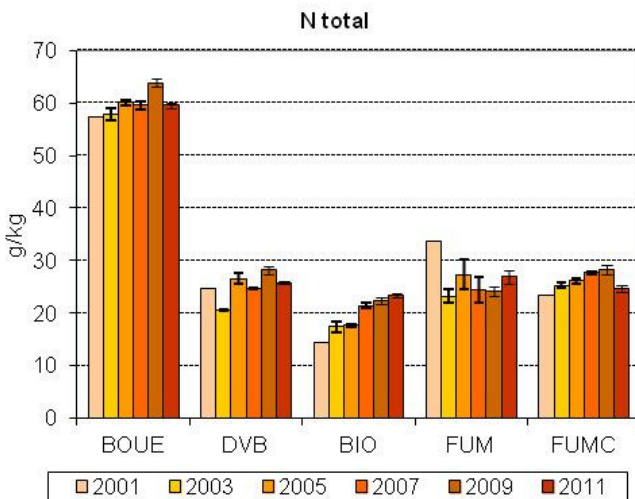


Figure 41 : Évolution des teneurs en N total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

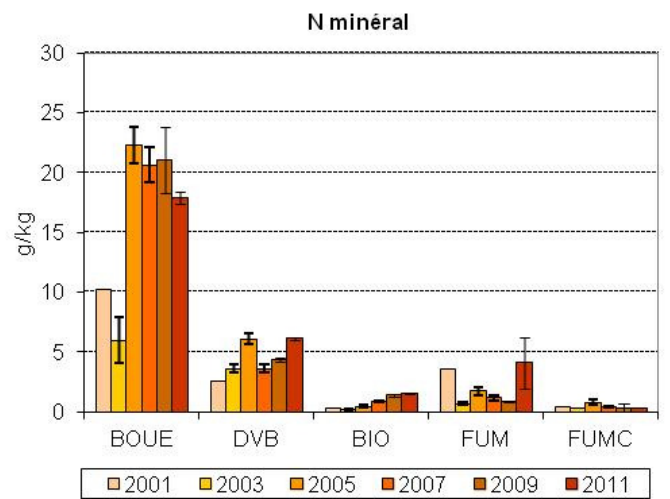


Figure 42 : Évolution des teneurs en N minéral dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

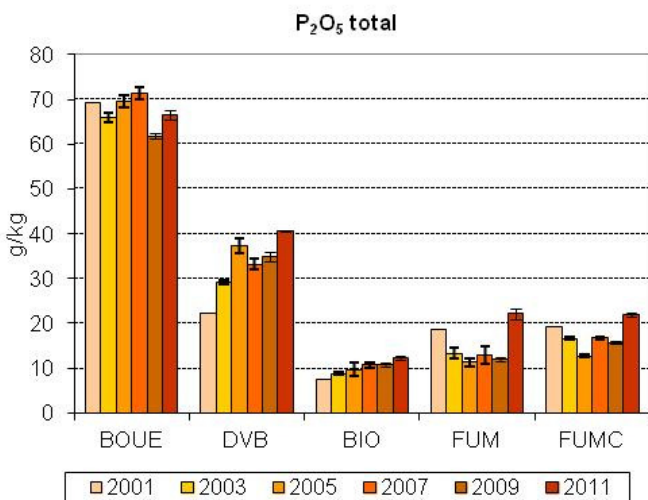


Figure 43 : Évolution des teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

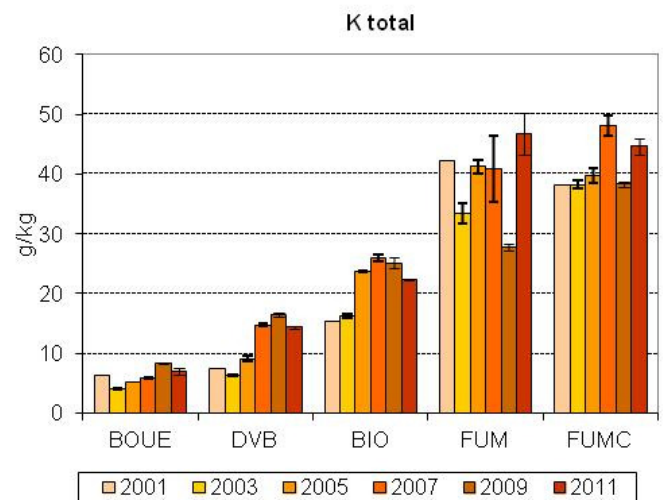


Figure 44 : Évolution des teneurs en K total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

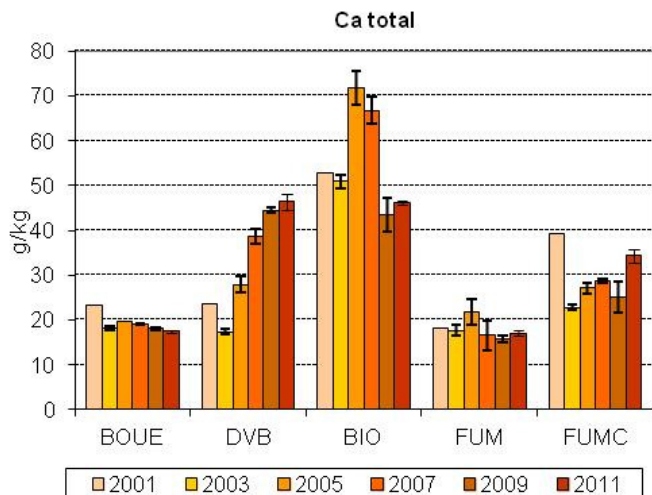


Figure 45 : Évolution des teneurs en Ca total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

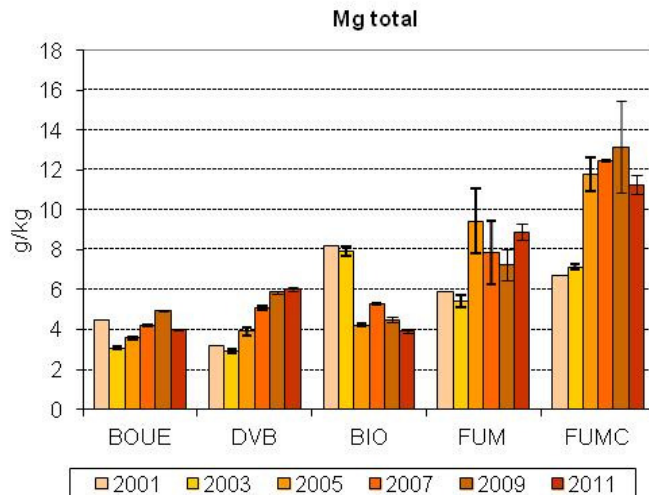


Figure 46 : Évolution des teneurs en Mg total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

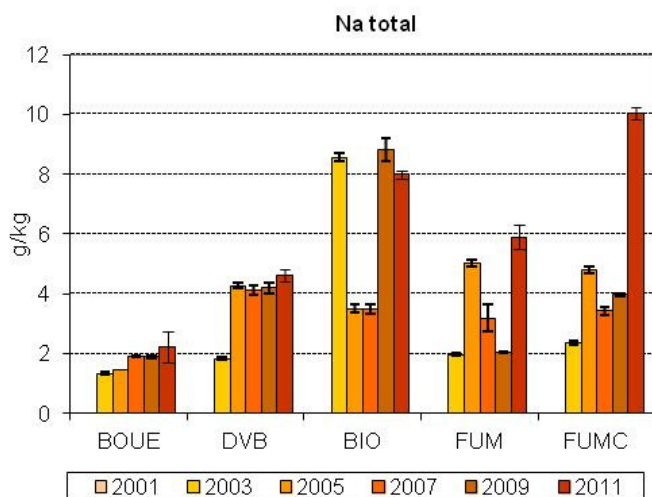


Figure 47 : Évolution des teneurs en Na total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS



Tableau 12 : Teneurs en éléments traces dans les produits épandus les 13 et 14/12/2010, moyenne et écart-type sur 3 échantillons. Échantillons séchés, broyés et analysés au LAS INRA Arras

	Al <sup>a</sup>	Fe <sup>a</sup>	Mn <sup>a</sup>	Ag <sup>a</sup>	B <sup>CEE9.1</sup>	Cd <sup>a</sup>	Co <sup>a</sup>	Cr <sup>a</sup>	Cu <sup>a</sup>	Mo <sup>a</sup>	Ni <sup>a</sup>	Pb <sup>a</sup>	Zn <sup>a</sup>	As <sup>b</sup>	Se <sup>b</sup>	Hg <sup>c</sup>
	g / kg MS			mg / kg MS												
<b>BOUE</b>	36,6	6,4	0,11	3,56	28,3	0,81	35,8	33,3	353	8,3	19,6	33,8	456	7,7	4,8	1,17
	0,8	0,1	0,001	0,102	0,6	0,016	8,8	0,4	4	0,1	0,5	0,4	7,1	1,21	1,25	0,05
<b>DVB</b>	33,7	23,7	0,35	2,28	21,3	0,82	28,7	55,7	215	5,7	33,1	62,8	576	9,8	2,2 <sup>d</sup>	0,73
	0,5	1,3	0,012	0,021	3,4	0,019	4,9	2,2	5,9	0,1	1,1	5,1	3,1	0,6	0,71	0,01
<b>BIO</b>	25,2	11,7	0,3	0,28	18,7	0,44	39	25,4	67	1,5	10,3	52,3	237	5,6	2,8 <sup>d</sup>	0,2
	0,4	0,1	0,01	0,021	0,3	0,002	4,9	0,2	2,9	0,02	0,6	9	62,1	0,75	0,77	0,004
<b>FUM</b>	1,3	1,2	0,27	0,012	31,6	0,3	5,1	12,7	47	2,4	5,8	1,6	275	0,7 <sup>d</sup>	1,6 <sup>d</sup>	0,07
	0,1	0,1	0,015	0,001	2	0,017	1,2	4,5	1,5	0,02	2,3	0,02	19,3	0,34	0,42	0,003
<b>FUMC</b>	7,3	4,7	0,29	0,034	25,9	0,29	11,1	13,5	42	2,8	7,2	5	254	0,9 <sup>d</sup>	1,3 <sup>d</sup>	0,06
	0,6	0,3	0,004	0,006	0,9	0,022	0,8	0,5	1	0,1	0,2	0,1	8	0,12	0,31	0,01
<b>Arrêté 8/01/1998 (BOUE)</b>	-	-	-	-	-	10	-	1000	1000	-	200	800	3000	-	-	10
<b>NFU 44 095<sup>e</sup></b>	-	-	-	-	-	3	-	120	300	-	60	180	600	18	12	2
<b>NFU 44-051<sup>f</sup></b>	-	-	-	-	-	3	-	120	300 600 <sup>g</sup>	-	60	180	600 1200 <sup>g</sup>	18	12	2

<sup>a</sup> Extraction HF

<sup>b</sup> Extraction eau régale

<sup>c</sup> Méthode par combustion

<sup>d</sup> Valeurs inférieures aux limites de quantification : utilisation des valeurs brutes non certifiées

<sup>e</sup> Norme relative aux composts de MIATE

<sup>f</sup> Norme relative aux amendements organiques

<sup>g</sup> valeur limite exprimée en mg/kg MO

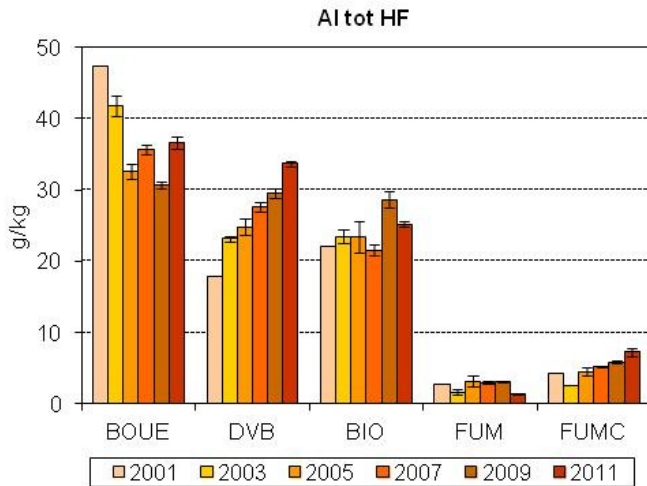


Figure 48 : Évolution des teneurs en Al total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

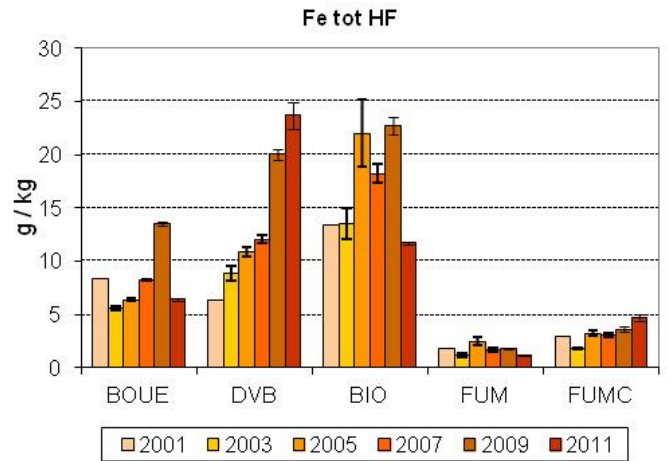


Figure 49 : Évolution des teneurs en Fe total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/kg MS

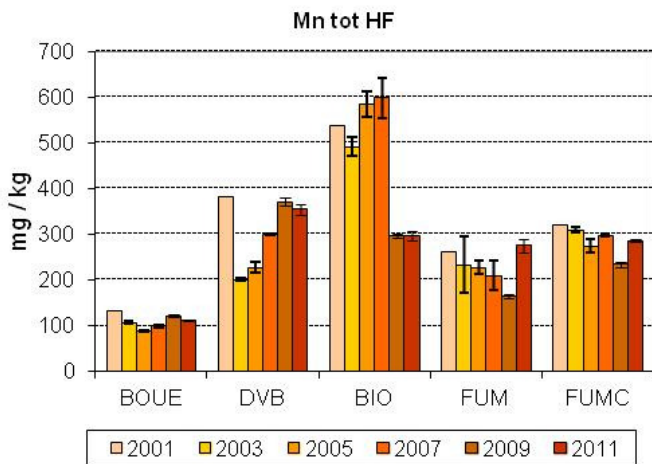


Figure 50 : Évolution des teneurs en Mn total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

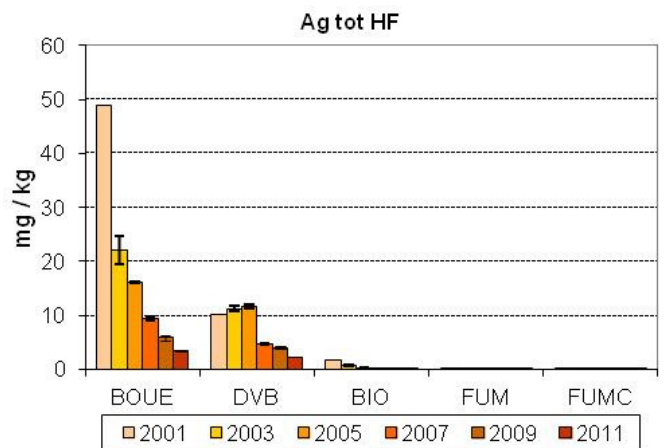


Figure 51 : Évolution des teneurs en Ag total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

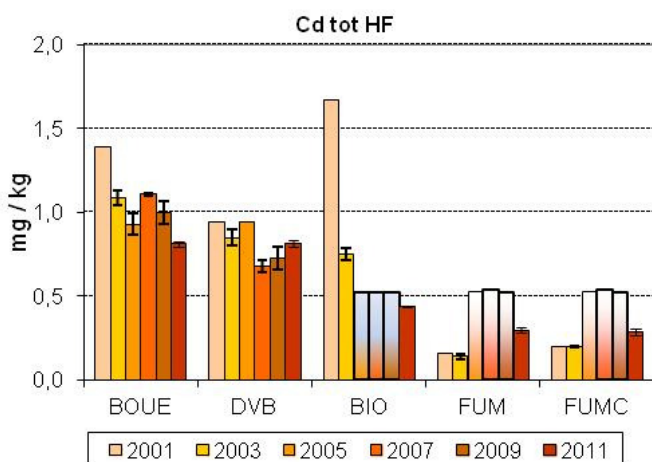


Figure 52 : Évolution des teneurs en Cd total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

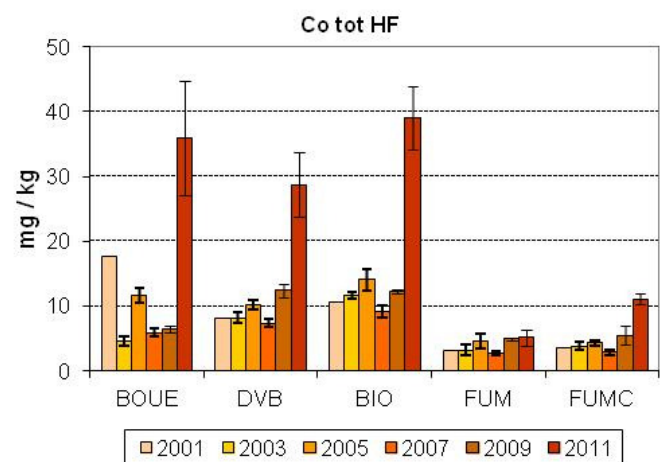


Figure 53 : Évolution des teneurs en Co total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

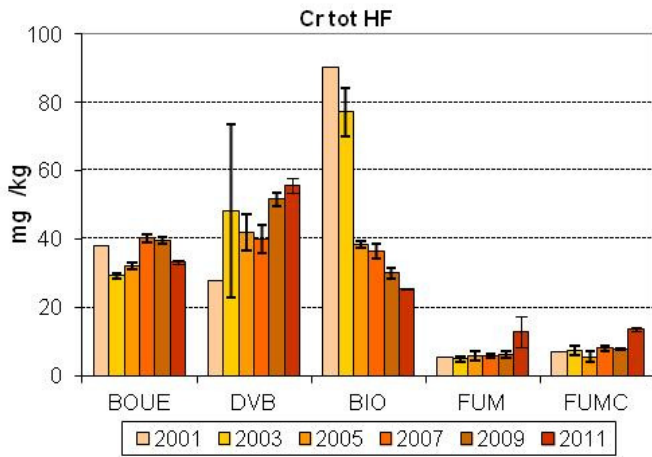


Figure 54 : Évolution des teneurs en Cr total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

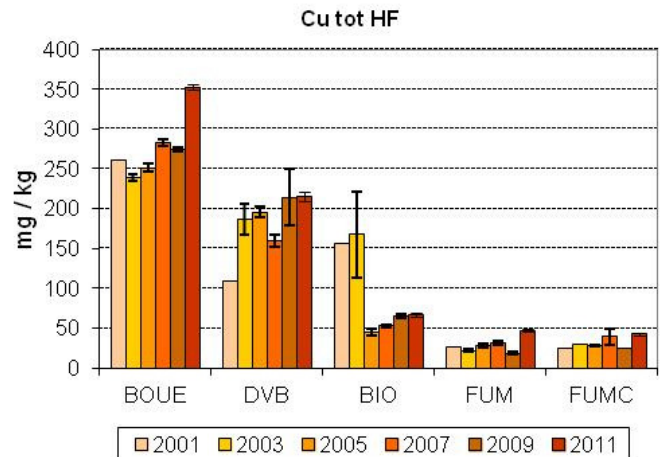


Figure 55 : Évolution des teneurs en Cu total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

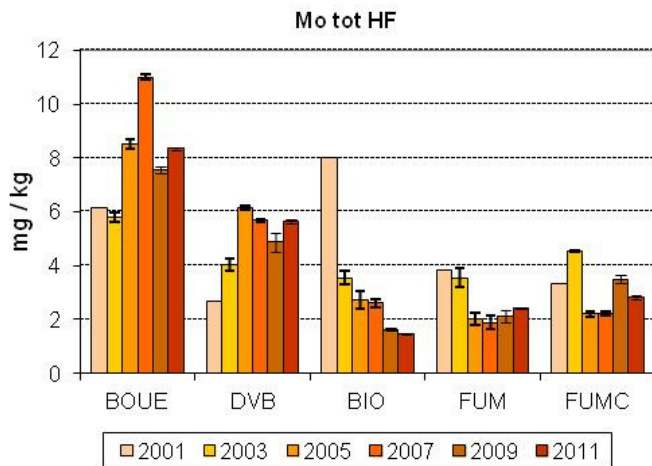


Figure 56 : Évolution des teneurs en Mo total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

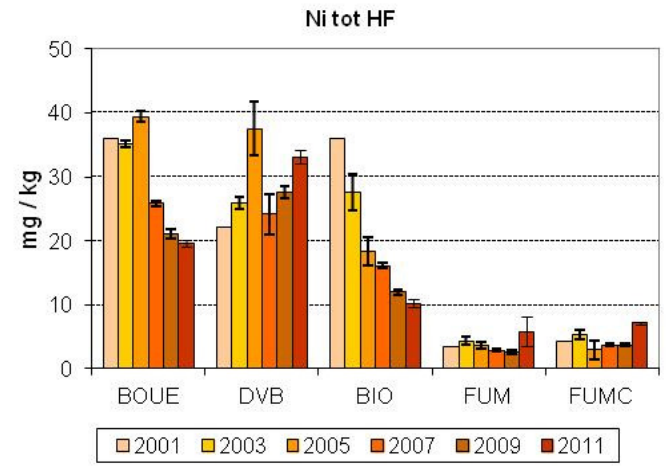


Figure 57 : Évolution des teneurs en Ni total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

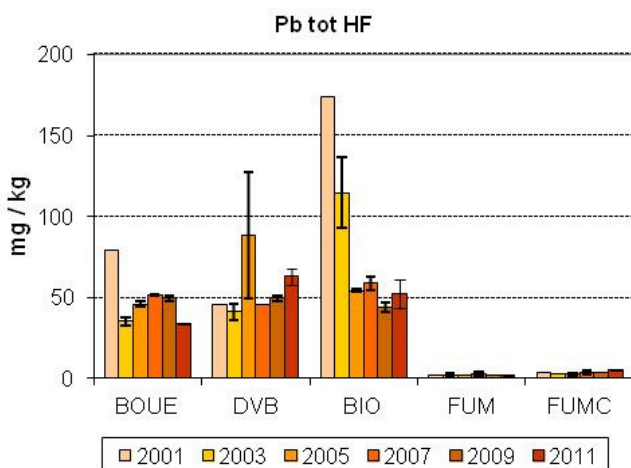


Figure 58 : Évolution des teneurs en Pb total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

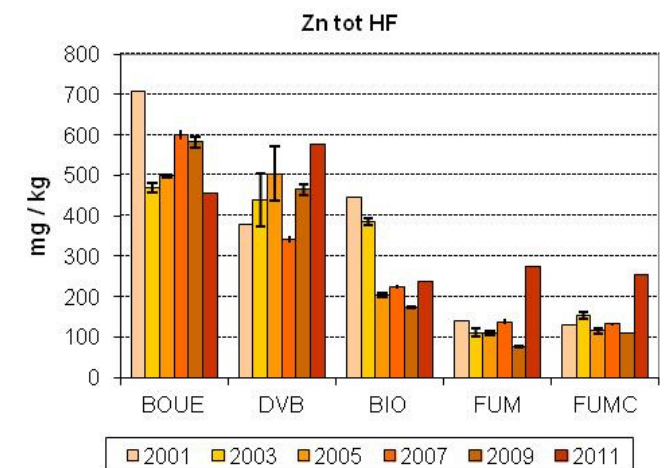


Figure 59 : Évolution des teneurs en Zn total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

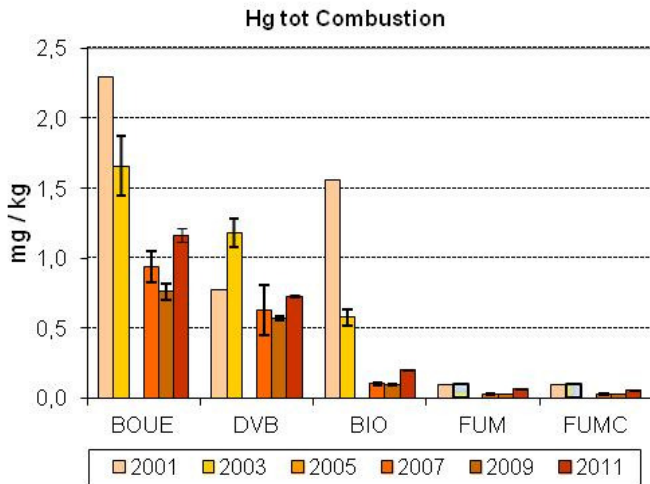


Figure 60 : Évolution des teneurs en Hg total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

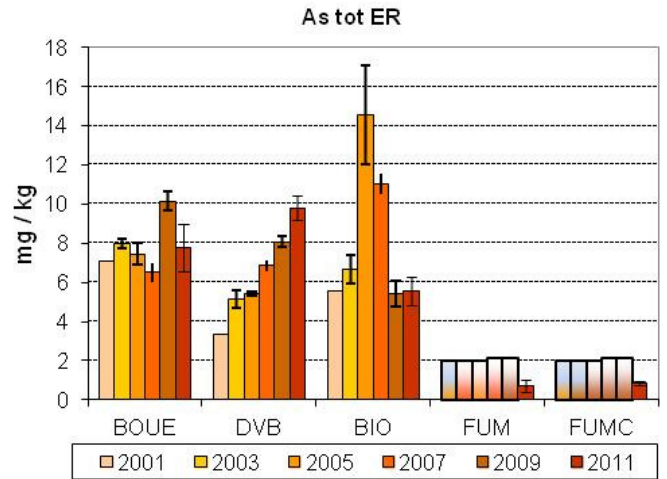


Figure 61 : Évolution des teneurs en As total dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

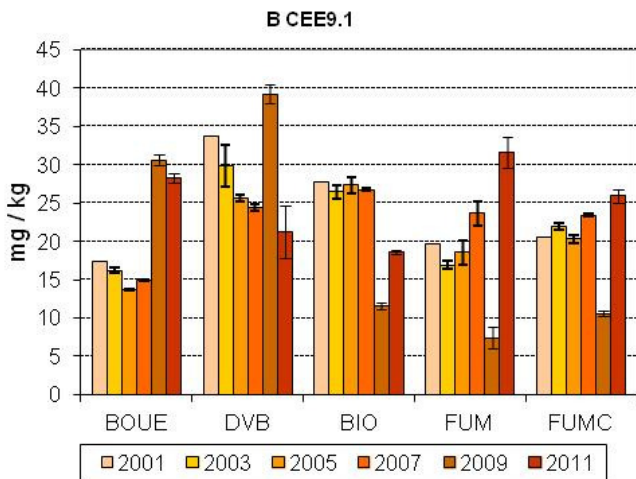


Figure 62 : Évolution des teneurs en B CEE 9.1 dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS

Tableau 13 : Teneurs en composés traces organiques HAP<sup>a</sup> dans les produits épandus les 13 et 14/12/2010, moyenne et écart-type sur 3 échantillons. Échantillons séchés, broyés et analysés au LAS INRA Arras (en bleu : HAP suivis dans la réglementation)

µg / kg MS	Naphtalene	Acénaphthene	Fluorene	Fluoranthene	Benzo(b) fluoranthene	Benzo(a) pyrene	Indéno(123cd) pyrene	Phénanthrene	Anthracene	Pyrene	Benzo(a) anthracene	Chrysene	Benzo(k) fluoranthene	Dibenzo(ah) anthracene	Benzo(ghi) perylene	Acénaphthylene
<b>BOUE</b>	< 85 -	< 43 -	< 21 -	458 18	143 16	112 3	< 42 -	125 10	23 1	296 12	107 25	259 39	64 6	< 85 -	<210 -	<130 -
<b>DVB</b>	< 85 -	45 4	72 5	627 9	206 9	175 15	149 27	627 69	72 8	590 91	197 8	326 14	106 5	< 85 -	<210 -	<127 -
<b>BIO</b>	< 85 -	< 43 -	< 21 -	316 46	138 27	116 34	159 42	333 12	20 <sup>b</sup> 8	225 37	132 31	<210 -	73 17	< 85 -	<210 -	<127 -
<b>FUM</b>	< 85 -	< 43 -	< 21 -	< 42 -	< 42 -	< 42 -	< 42 -	< 42 -	< 21 -	< 42 -	< 42 -	<210 -	< 21 -	< 85 -	<210 -	<127 -
<b>FUMC</b>	< 85 -	< 43 -	< 21 -	< 42 -	< 42 -	< 42 -	< 42 -	37 <sup>b</sup> 14	< 21 -	< 42 -	< 42 -	<210 -	< 21 -	< 85 -	<210 -	<127 -
<b>Arrêté 8/01/1998</b>				5000	2500	2000										
<b>NFU 44-095<sup>c</sup> NFU 44-051<sup>d</sup></b>				4000	2500	1500										

<sup>a</sup> Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ; analyse selon méthode XP X33-012

<sup>b</sup> 1 ou 2 valeurs sur 3 < LQ → LQ/2 prise comme valeur dans la moyenne

<sup>c</sup> Norme relative aux composts de MIATE

<sup>d</sup> Norme relative aux amendements organiques

< x → LQ

Tableau 14 : Teneurs en composés traces organiques PCB<sup>a</sup> dans les produits épandus les 13 et 14/12/2010, moyenne et écart-type sur 3 échantillons. Échantillons séchés, broyés et analysés au LAS INRA Arras (en bleu : PCB visés par la réglementation)

µg / kg MS	PCB 18	PCB 28	PCB 33	PCB 52	PCB 44	PCB 70	PCB 101	PCB 118	PCB 153	PCB 105	PCB 138	PCB 187	PCB 128	PCB 180	PCB 170	PCB 194	PCB 195	PCB 199	PCB 206	PCB 209	PCB Σ <sup>c</sup>	
<b>BOUE</b>	2	3,3	0,6	7,7	3,4	6,3	14	9,3	15,1	3,3	9,7	3	1,5	6,4	2,6	1,3	0,5	0,9	<0,22	<0,22	65	
	0,09	0,08	0,03	0,21	0,06	0,09	0,5	0,57	0,67	0,27	0,74	0,36	0,29	0,09	0,19	0,25	0,04	0,12	-	-	2,3	
<b>DVB</b>	2,4	8,6	0,9	7,7	5,2	7,5	9,3	7,1	15,3	2,7	10,9	3,3	1,8	8	3,5	1,4	0,6	1,2	<0,21	<0,21	67	
	0,1	0,26	0,08	0,12	0,12	0,12	0,29	0,07	0,36	0,1	0,21	0,05	0,04	0,22	0,02	0,11	0,02	0,06	-	-	0,9	
<b>BIO</b>	0,4	1	0,3	3	1,8	3,3	5,8	5,7	8,8	2,5	8	2,4	1,8	4,6	1,9	0,9	0,3	1,6	1,2	<0,21	37	
	0,02	0,1	0,03	0,13	0,03	0,16	0,16	0,22	0,46	0,09	0,3	0,12	0,07	0,31	0,25	0,21	0,05	0,15	0,1	-	1,6	
<b>FUM</b>	<0,21	0,2 <sup>b</sup>	<0,21	0,39	0,15 <sup>b</sup>	0,33	0,44	<0,21	0,25	<0,21	0,15 <sup>b</sup>	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<1,9 <sup>b</sup>	
	-	0,08	-	0,04	0,07	0,11	0,09	-	0,06	-	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23
<b>FUMC</b>	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	0,21 <sup>b</sup>	0,16 <sup>b</sup>	0,54	<0,21	0,48	0,17 <sup>b</sup>	<0,21	0,15 <sup>b</sup>	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21	<2,1 <sup>b</sup>	
	-	-	-	-	-	-	0,11	0,08	0,15	-	0,08	0,1	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	0,4
<b>Arrêté 8/01/1998</b>																						800
<b>NFU 44-095<sup>d</sup></b>																						800

<sup>a</sup> Polychlorobiphenyls ; analyse selon méthode INRA par CPG-HRMS

<sup>b</sup> 1 ou 2 valeurs sur 3 < LQ → LQ/2 prise comme valeur dans la moyenne

<sup>c</sup> Somme des 7 principaux PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180)

<sup>d</sup> Norme relative aux composts MIATE

< x → LQ

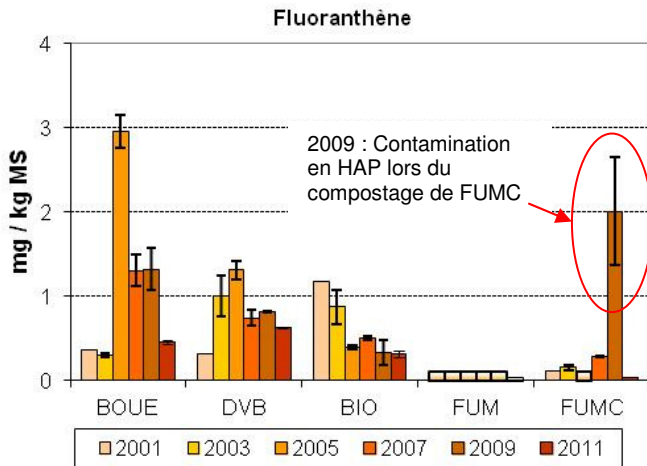


Figure 63 : Évolution des teneurs en Fluoranthène dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

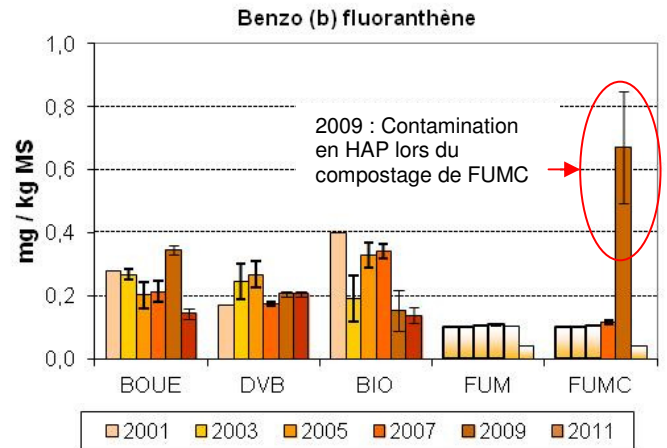


Figure 64 : Évolution des teneurs en Benzo(b)fluoranthène dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

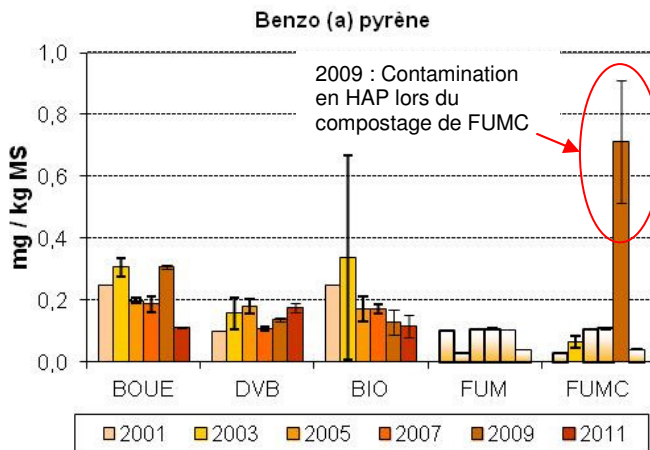


Figure 65 : Évolution des teneurs en Benzo(a)pyrène dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

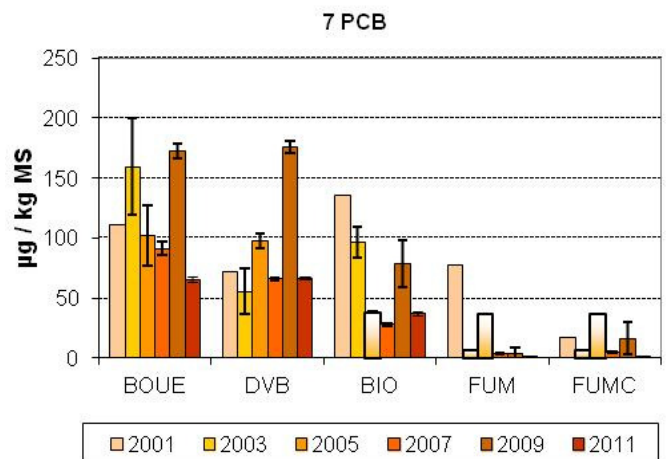


Figure 66 : Évolution des teneurs en PCB (sommés des 7 PCB visés par la réglementation) dans les PRO épandus de 2001 à 2011 en µg/kg MS (les histogrammes en couleurs dégradées correspondent aux limites de quantification, les teneurs dans les PRO concernés sont inférieures à ces limites)

## 2.2.2 Flux d'éléments associés aux épandages

Les flux d'éléments apportés par les produits résiduels organiques en 2011 sont présentés dans les tableaux 15 à 18.

Les évolutions des flux d'éléments apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 sont présentées sur les figures 69 à 94.

### 2.2.2.1 Flux d'éléments majeurs

Lors des épandages, les doses d'application de tous les produits sont calculées sur la base de leur teneur en azote total ( $N_{tot}$ ), de façon à apporter des doses identiques conformes à l'arrêté pris en application de la directive « Nitrates », soit 170 kg  $N_{tot}$ /ha en moyenne sur la surface épandable. Les doses de produit brut à épandre sont calculées d'après une première analyse faite sur des échantillons prélevés les jours précédant l'épandage. Les doses d'azote réellement épandues sont ensuite recalculées d'après les résultats d'analyses faites sur des échantillons représentatifs des produits épandus et prélevés au moment de l'épandage.

En 2011, les doses d'azote total apportées sont inférieures aux 170 kg/ha pour BOUE (128 kg/ha) en raison d'une estimation des teneurs en N total lors de l'analyse préliminaire supérieure aux résultats des mesures effectuées sur les échantillons épandus. Pour les autres PRO, les doses effectivement épandues sont proches des 170 kg  $N_{tot}$ /ha.

BOUE présentant des teneurs en azote total plus de deux fois supérieures aux autres PRO (tableau 11), les 170 kgN/ha sont atteints avec un moindre tonnage épandu. Ceci implique des flux de carbone organique plus faibles pour la boue avec 0,8 TC/ha (figure 67). FUM apporte les quantités de matière organique les plus élevées avec 2,1 TC/ha.

BOUE et DVB sont les produits qui apportent le plus d'azote minéral  $N_{min}$  (figure 68). Les apports de N minéral par FUM sont en hausse en 2011. Le flux élevé d'azote minéral apporté par BOUE, associé à la capacité de ce PRO à minéraliser rapidement une partie du N total qu'il contient, constitueront des stocks d'azote minéral supérieurs aux autres traitements dans l'horizon de surface en sortie hiver (cf. 2.5.2).

La capacité fertilisante des PRO en d'autres éléments majeurs est toujours mise en évidence, avec des particularités propres aux types de produits. BOUE et DVB apportent plus de phosphore total ( $P_2O_5$  total) avec 150 kg/ha pour BOUE, et 290 kg/ha pour DVB, en augmentation. Les apports de  $P_2O_5$  total par BIO sont stables par rapport à la moyenne des épandages précédents. Les flux issus des fumiers sont en augmentation et représentent des apports non négligeables (120 à 140 kg  $P_2O_5$  total /ha). L'étude de la disponibilité du P évaluée par dilution isotopique montre une disponibilité quasi similaire du  $P_2O_5$  total des PRO par rapport à celui d'un engrais minéral classique (Morel et al., 2007<sup>1</sup>).

DVB et BIO constituent des flux de calcium (Ca) de plus de 300 kg/ha, en hausse. La contribution en potassium (K) est conséquente pour les fumiers (250 à 300 kg/ha, en augmentation), mais également intéressante pour BIO (170 kg/ha) et DVB (100 kg/ha). FUM, FUMC et DVB apportent plus de magnésium (Mg, 40 à 70 kg/ha), FUMC et BIO plus de Sodium (Na, 60 kg/ha).

---

<sup>1</sup> Morel C., Schaub A., Valentin N., Houot S. - 2007 - Valeur fertilisante de Produits Résiduels Organiques (PRO) : Exemple du phosphore. In: "Retour au sol des produits résiduels organiques: des essais au champ de longue durée. Intérêt d'un réseau", S. Houot (ed.), Journée technique, ADEME/INRA, Colmar, 27/11/2007, pp. 33-42 (communication orale).



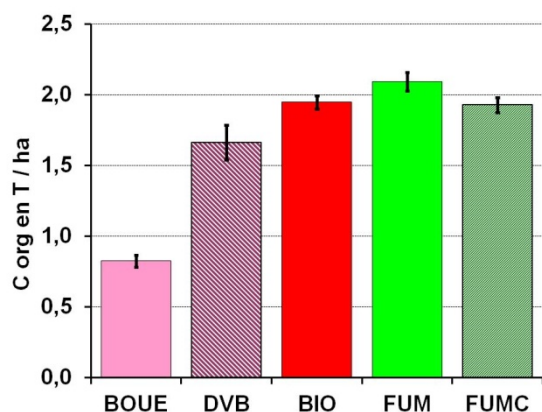


Figure 67 : Flux de carbone organique lors de l'épandage 2011 en T/ha

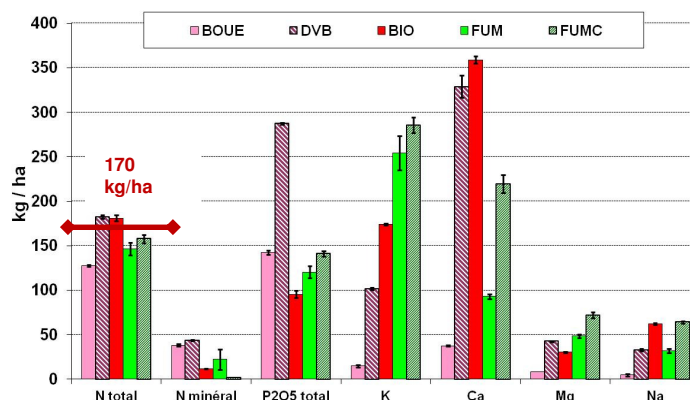


Figure 68 : Flux d'éléments majeurs lors de l'épandage 2011 en kg/ha

### 2.2.2.2 Flux d'éléments traces et de composés traces organiques

Tous les produits résiduels organiques sont conformes à la réglementation : arrêté du 08/01/98 pour BOUE, NF U 44-095 pour DVB et NF U 44-051 pour BIO et les fumiers.

Dans le traitement **BOUE**, on observe, par rapport aux épandages précédents, une baisse des flux d'Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn. Ils sont stables pour Al, Mo et Hg. Les seules augmentations de flux concernent le Cu, et de façon importante le Co lié à une hausse des concentrations.

Avec des concentrations en baisse, les flux en HAP et PCB générés par BOUE sont réduits.

Le traitement **DVB** génère des flux en augmentation pour la grande majorité des éléments traces : Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, Hg, As. Cela est lié aux augmentations de concentrations. Seuls les flux de Cd sont stables et les flux d'Ag en baisse. Les flux d'ETM sont aujourd'hui plus élevés avec le traitement DVB qu'avec le traitement BIO, ce qui inverse la tendance habituellement observée lors des premiers épandages sur l'essai.

Le constat est le même pour les CTO. DVB est le PRO urbain qui apporte les flux les plus élevés pour tous les composés organiques recherchés. Cependant les flux en HAP et PCB sont bien inférieurs aux limites de la norme NFU 44-095.

Dans le traitement **BIO**, la diminution des flux d'éléments traces se confirme, avec des valeurs similaires à 2009, pour Cr, Mn, Mo, Ni et Fe. Cependant, après une baisse en 2009, en partie due à un tonnage de MS épandue plus faible, certains apports d'éléments sont en hausse, notamment pour Al, Pb, Zn, Ag, Co, Cu, Hg.

Pour les HAP également, les quantités épandues supérieures en 2011 (+ 2T MS/ha), génèrent des flux en hausse par rapport à 2009, notamment pour fluoranthène, benzo(b)fluoranthène et benzo(a)pyrène.

Les apports de PCB avec ce compost sont plus élevés qu'avec le produit issu de la précédente plateforme de compostage en 2007.

Les **fumiers** apportent des flux d'ETM en augmentation pour Cu, Mn, Ni, Zn et Hg, et également en Al, Co, Fe et Pb avec FUMC. Les flux d'Al, As et Fe baissent avec FUM, uniquement les flux d'Ag avec FUMC. Ils sont stables dans les deux produits pour Cd et Mo.

Les flux de matière sèche supérieurs pour ces PRO, génèrent des apports en Zn, B, Fe, Mn supérieurs à BOUE, et des flux similaires pour Cd, Co, Cr, Mo et Ni.

Les HAP ne sont pas quantifiés dans les fumiers.

Les flux de PCB ont diminué par rapport aux valeurs de 2007 et 2009. La somme des 7 PCB s'élève à 10 mg/ha pour les fumiers.

**Tableau 15** : Doses épandues les 13 et 14/12/2010 et flux d'éléments majeurs associés ; les flux sont calculés d'après les résultats d'analyse du LAS présentés dans le tableau 11.

	<b>MB</b>	<b>MS</b>	<b>MO</b>	<b>C<sub>orga</sub></b>	<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>N<sub>minéral</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>
	T/ha				kg/ha						
<b>BOUE</b>	12,6	2,1	1,5	0,8	128	38	143	15	38	9	5
<b>DVB</b>	10,7	7,1	3,2	1,7	183	44	288	102	329	43	33
<b>BIO</b>	9,3	7,8	3,7	1,9	181	12	95	174	359	31	62
<b>FUM</b>	28,4	5,4	4,1	2,1	147	22	121	254	93	49	32
<b>FUMC</b>	28,9	6,4	3,8	1,9	158	2	141	286	220	72	64

**Tableau 16** : Flux d'éléments traces apportés au sol lors des épandages les 13 et 14/12/2010 ; les flux sont calculés d'après les résultats d'analyse du LAS présentés dans le tableau 12.

	<b>Ag</b>	<b>B</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Hg</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
	g/ha												kg/ha			
<b>BOUE</b>	8	61	1,7	77	71	756	18	42	72	979	17	10	2,5	79	14	0,2
<b>DVB</b>	16	151	5,8	204	395	1 528	40	235	445	4 084	70	16	5,2	239	168	2,5
<b>BIO</b>	2,2	145	3,4	303	197	520	11	80	406	1 843	43	22	1,6	196	91	2,3
<b>FUM</b>	0,1	172	1,6	28	69	258	13	32	8	1 498	4	9	0,4	7	6	1,5
<b>FUMC</b>	0,2	166	1,8	71	87	271	18	46	32	1 626	6	8	0,4	47	30	1,8
<b>Réglementation Boue (pH &gt;6)<sup>a</sup></b>	-	-	30	-	3000	3000	-	600	3000	9000	-	-	30	-	-	-
<b>Directive boue CEE<sup>a, b</sup></b>	-	-	12	-	3600	3600	-	600	1200	9000	-	-	12	-	-	-
<b>NFU 44-095<sup>a, c</sup> NFU 44-051<sup>a, d</sup></b>	-	-	30	-	1200	2000	-	600	1800	6000	180	120	20	-	-	-

<sup>a</sup> Flux maximum multiplié par deux pour tenir compte des épandages bisannuels ;

<sup>b</sup> Directive en cours de révision (critères retenus pour 2025) ;

<sup>c</sup> Norme relative aux composts de MIATE ;

<sup>d</sup> Norme relative aux amendements organiques.

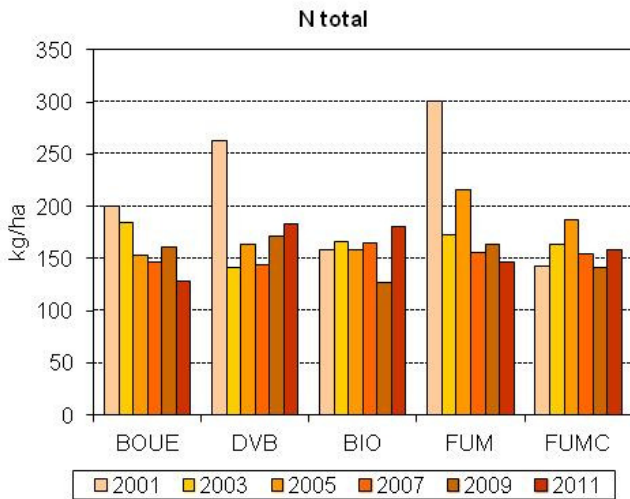


Figure 69 : Évolution des flux de N total apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en kg/ha

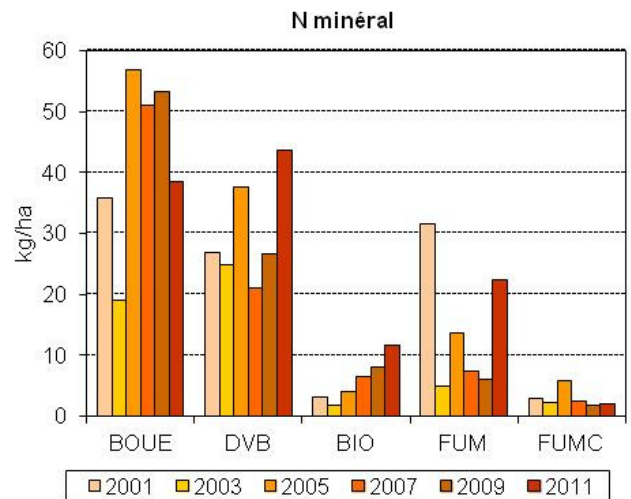


Figure 70 : Évolution des flux de N minéral apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en kg/ha

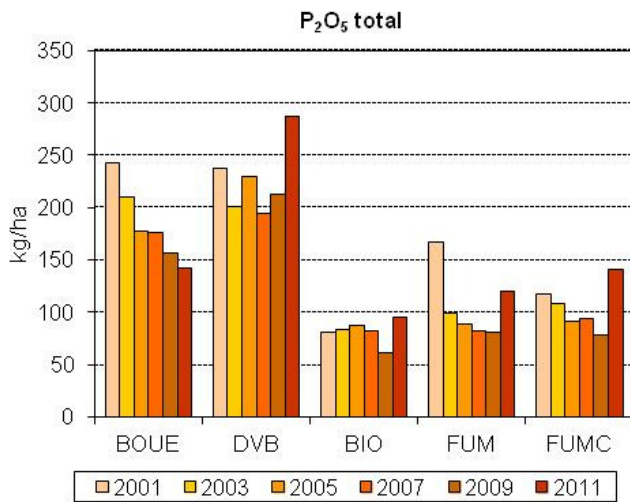


Figure 71 : Évolution des flux de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en kg/ha

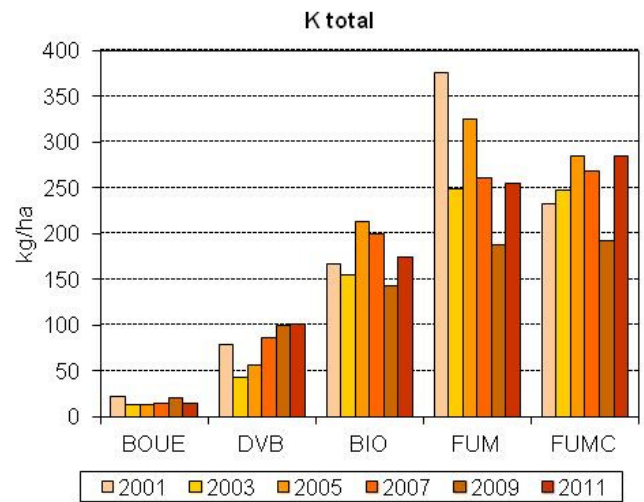


Figure 72 : Évolution des flux de K apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en kg/ha

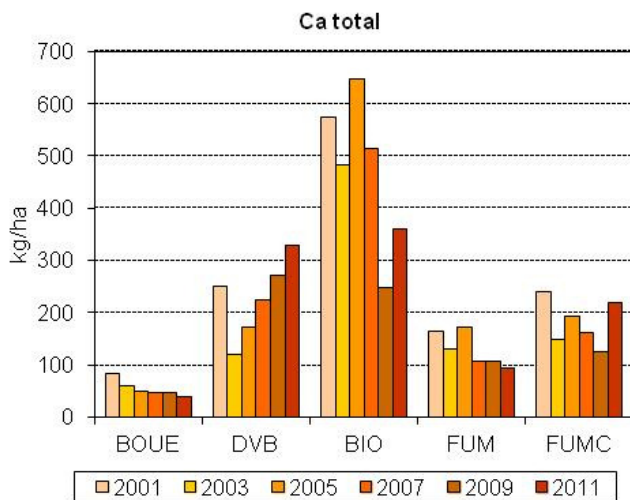


Figure 73 : Évolution des flux de Ca apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en kg/ha

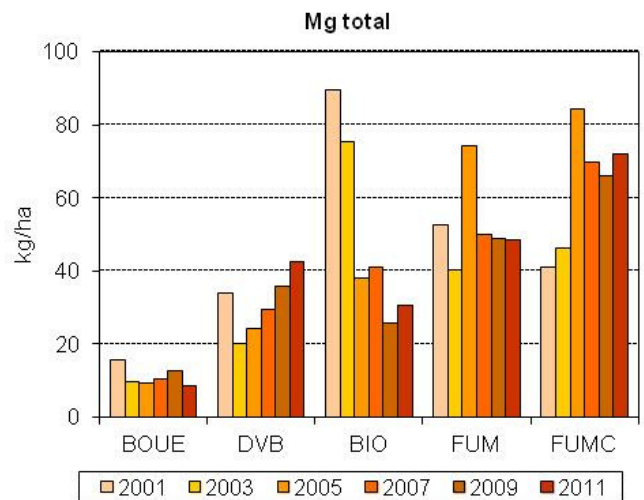


Figure 74 : Évolution des flux de Mg apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en kg/ha

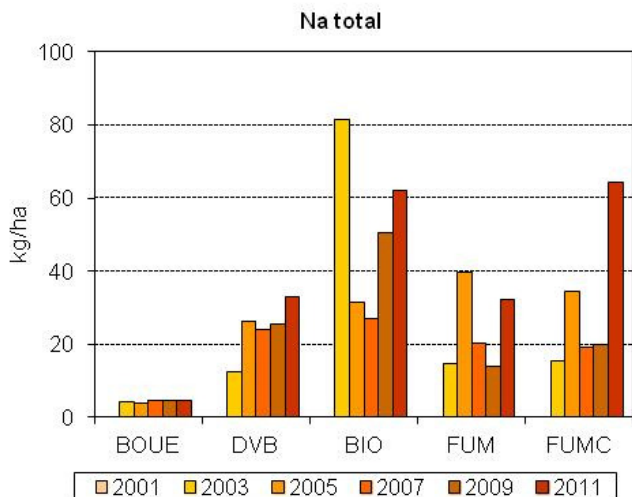


Figure 75 : Évolution des flux de Na apportés par les PRO épanchés de 2001 à 2011 en kg/ha

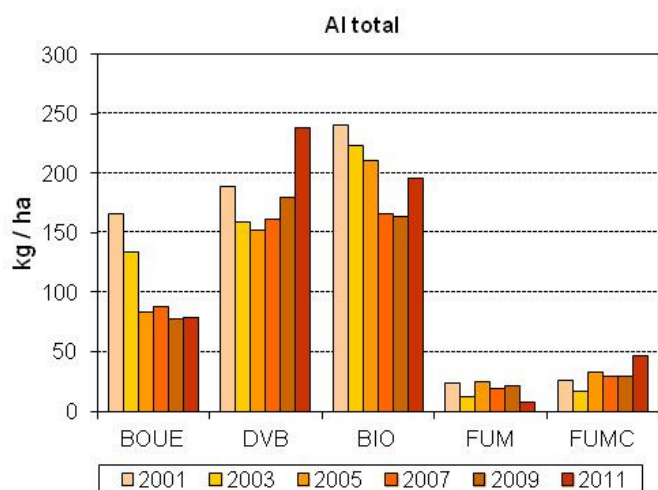


Figure 76 : Évolution des flux de Al apportés par les PRO épanchés de 2001 à 2011 en kg/ha

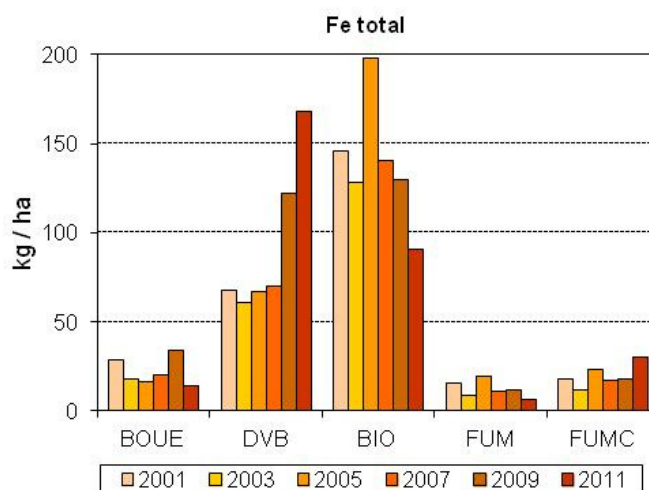


Figure 77 : Évolution des flux de Fe apportés par les PRO épanchés de 2001 à 2011 en kg/ha

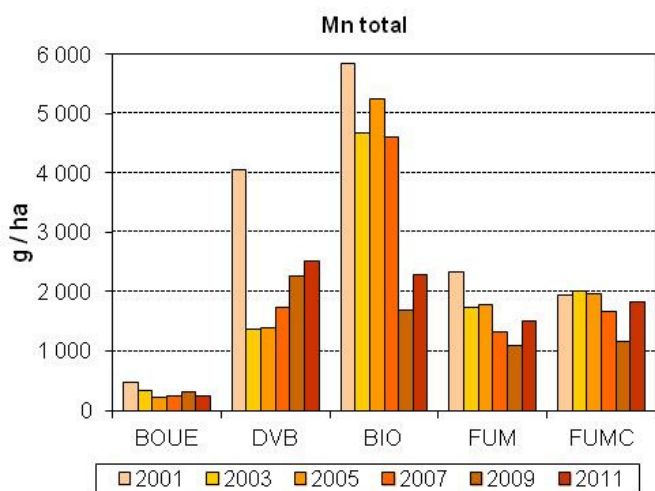


Figure 78 : Évolution des flux de Mn apportés par les PRO épanchés de 2001 à 2011 en g/ha

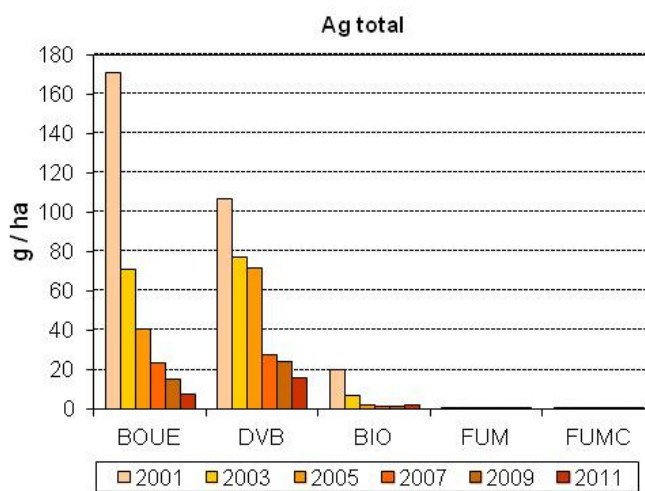


Figure 79 : Évolution des flux de Ag apportés par les PRO épanchés de 2001 à 2011 en g/ha

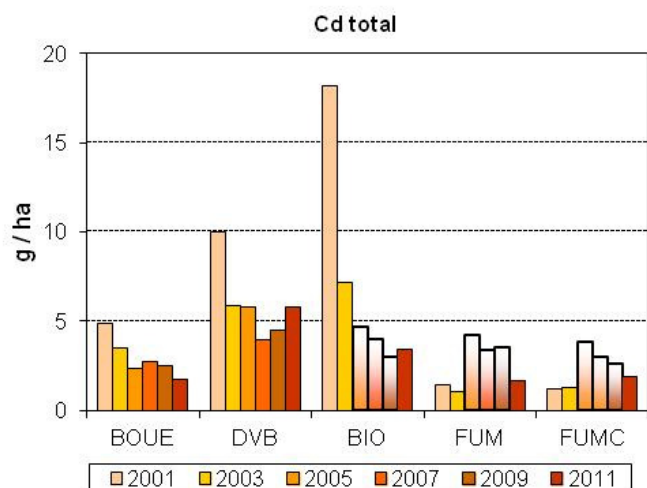


Figure 80 : Évolution des flux de Cd apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha (les histogrammes en couleurs dégradées présentent les flux calculés en utilisant les limites de quantification)

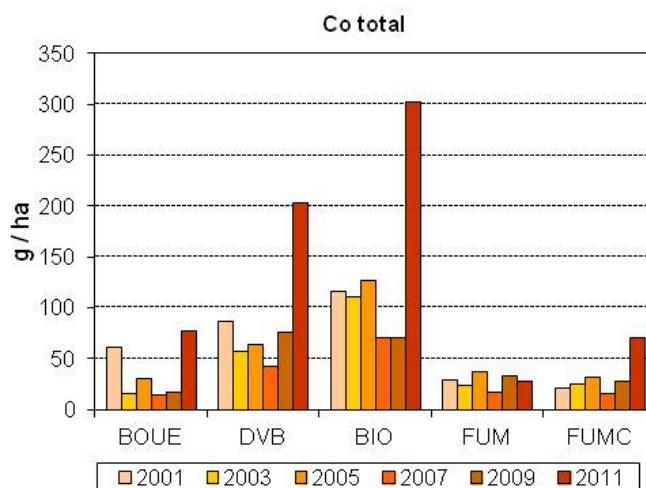


Figure 81 : Évolution des flux de Co apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

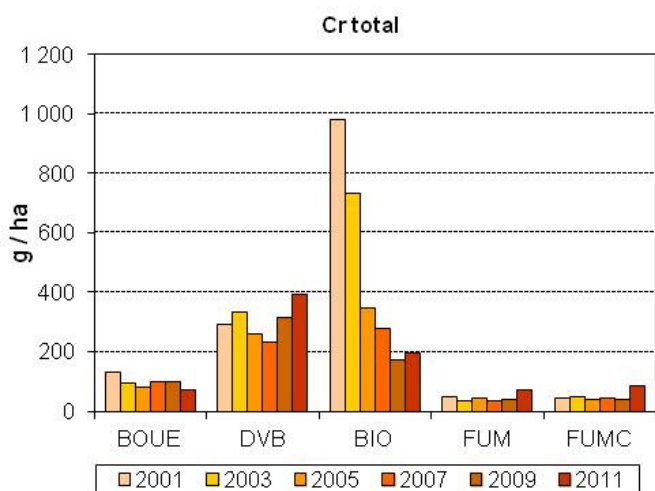


Figure 82 : Évolution des flux de Cr apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

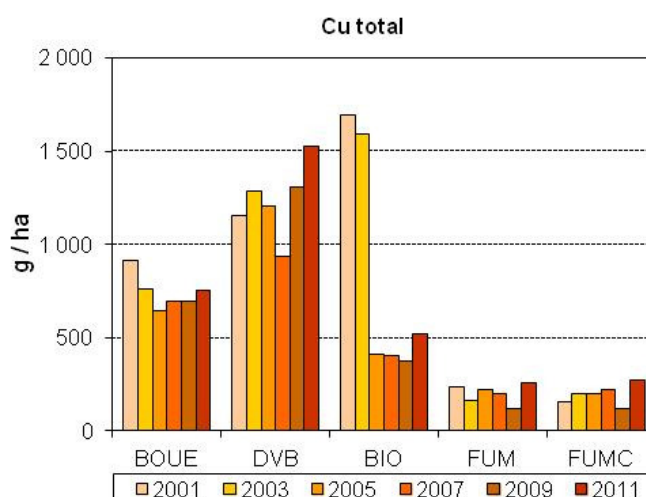


Figure 83 : Évolution des flux de Cu apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

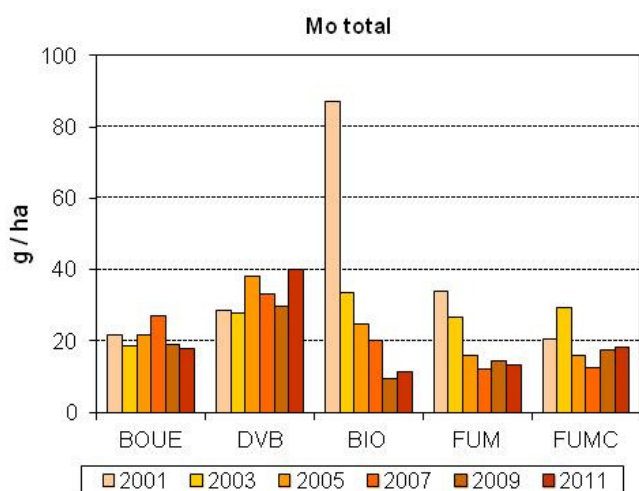


Figure 84 : Évolution des flux de Mo apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

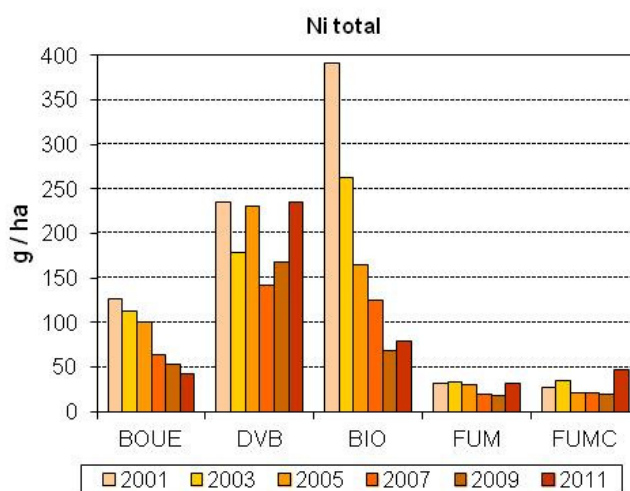


Figure 85 : Évolution des flux de Ni apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

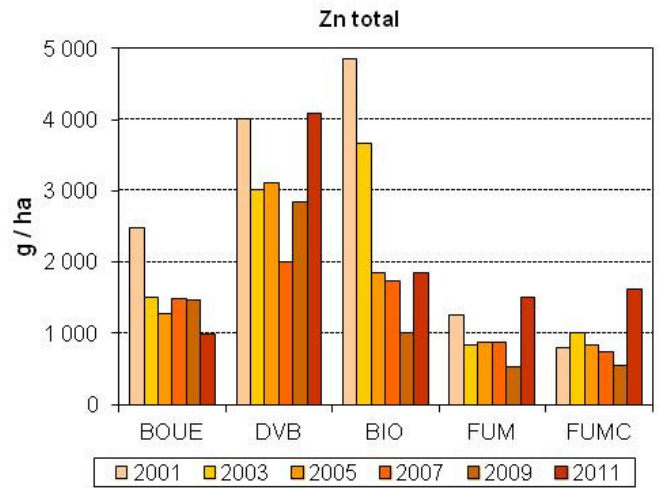
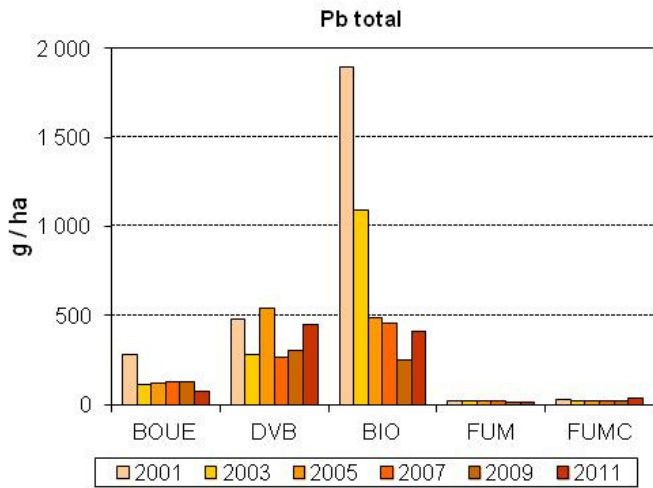


Figure 86 : Évolution des flux de Pb apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

Figure 87 : Évolution des flux de Zn apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

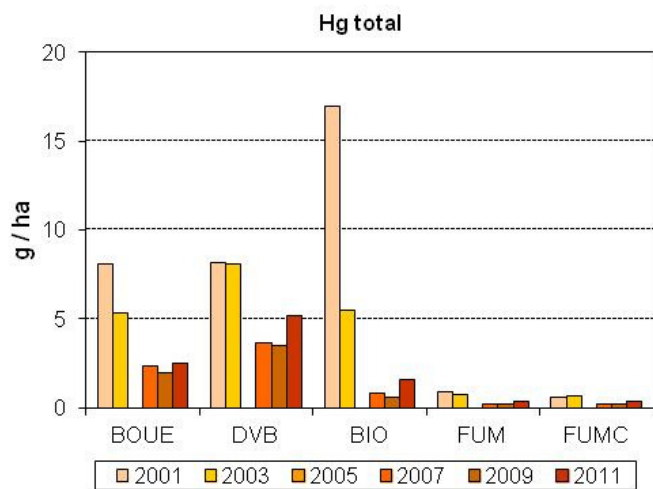


Figure 88 : Évolution des flux de Hg apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

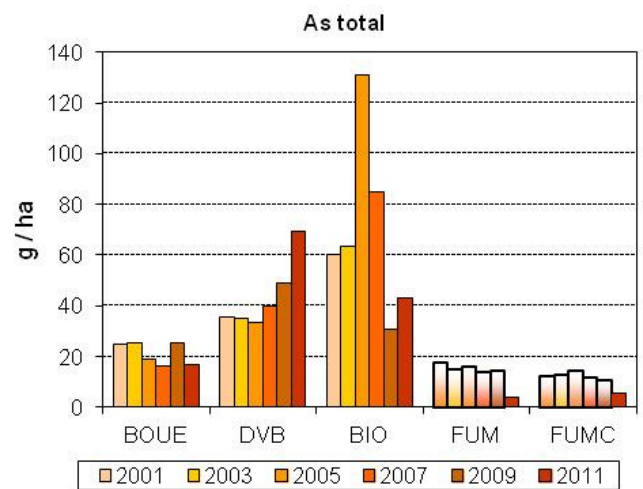


Figure 89 : Évolution des flux de As apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha (les histogrammes en couleurs dégradées présentent les flux calculés en utilisant les limites de quantification)

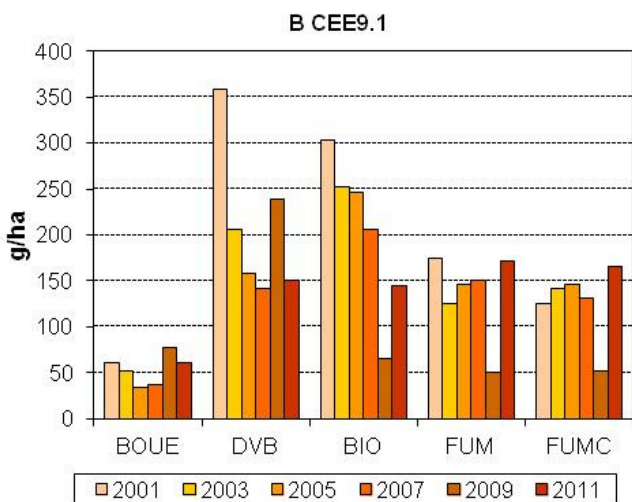


Figure 90 : Évolution des flux de B apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha

Tableau 17 : Flux de HAP apportés au sol lors des épandages les 13 et 14/12/2010 ; les flux sont calculés d'après les résultats d'analyse du LAS présentés dans le tableau 13 (en bleu : HAP suivis dans la réglementation)

g/ha	Naphtalene	Acénaphthene	Fluorene	Fluoranthene	Benzo(b)fluoranthene	Benzo(a)pyrene	Indéno(123cd)pyrene	Phénanthrene	Anthracene	Pyrene	Benzo(a)anthracene	Chrysene	Benzo(k)fluoranthene	Dibenzo(ab)anthracene	Benzo(ghi)perylene	Acénaphthylene
<b>BOUE</b>	<0,2	<0,1	<0,05	1	0,3	0,2	<0,1	0,3	0,1	0,6	0,2	0,6	0,1	<0,2	<0,5	<0,3
<b>DVB</b>	<0,6	0,3	0,5	4,4	1,5	1,2	1,1	4,5	0,5	4,2	1,4	2,3	0,8	<0,6	<1,5	<0,9
<b>BIO</b>	<0,6	<0,3	<0,2	2,5	1,1	0,9	1,2	2,6	0,2	1,7	1	<1,6	0,6	<0,6	<1,6	<1
<b>FUM</b>	<0,5	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	<1,2	<0,1	<0,5	<1,2	<0,7
<b>FUMC</b>	<0,5	<0,3	<0,1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,2	<0,1	<0,3	<0,3	<1,4	<0,1	<0,5	<1,4	<0,8
<b>Réglementation Boue</b>				15	8	6										
<b>NFU 44-095<sup>a</sup> NFU 44-051<sup>b</sup></b>				12	8	4										

<sup>a</sup> Norme relative aux composts de MIATE ; flux maximum multiplié par 2 pour tenir compte des épandages bisannuels

<sup>b</sup> Norme relative aux amendements organiques ; flux maximum multiplié par 2 pour tenir compte des épandages bisannuels.

< x → LQ

Tableau 18 : Flux de PCB apportés au sol lors des épandages les 13 et 14/12/2010 ; les flux sont calculés d'après les résultats d'analyse du LAS présentés dans le tableau 14 (en bleu : PCB suivis dans la réglementation)

mg/ha	PCB 18	PCB 28	PCB 33	PCB 52	PCB 44	PCB 70	PCB 101	PCB 118	PCB 153	PCB 105	PCB 138	PCB 187	PCB 128	PCB 180	PCB 170	PCB 194	PCB 195	PCB 199	PCB 206	PCB 209	PCB Σ <sup>a</sup>	
<b>BOUE</b>	4	7	1	16	7	13	30	20	32	7	21	6	3	14	6	3	1	2	<0,5	<0,5	140	
<b>DVB</b>	17	61	6	54	37	53	66	50	109	19	77	23	13	57	25	10	4	9	<1,5	<1,5	474	
<b>BIO</b>	3	8	2	24	14	26	45	44	68	19	62	18	14	36	15	7	3	12	9	<1,6	286	
<b>FUM</b>	<1,1	1,1	<1,1	2,1	0,8	1,8	2,4	<1,1	1,4	<1,1	0,8	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<11
<b>FUMC</b>	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	1,4	1	3,5	<1,3	3,1	1,1	<1,3	1	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	<1,3	<13
<b>Arrêté Boue<sup>b</sup></b>																						2400
<b>NFU 44-095<sup>b</sup></b>																						2400

<sup>a</sup> Somme des 7 principaux PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180) ;

<sup>b</sup> flux maximum multiplié par 2 pour tenir compte des épandages bisannuels

< x → LQ

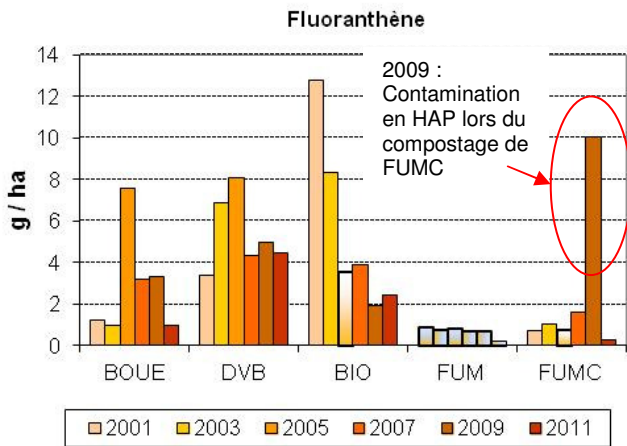


Figure 91 : Évolution des flux de Fluoranthène apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha (les histogrammes en couleurs dégradées présentent les flux calculés en utilisant les limites de quantification)

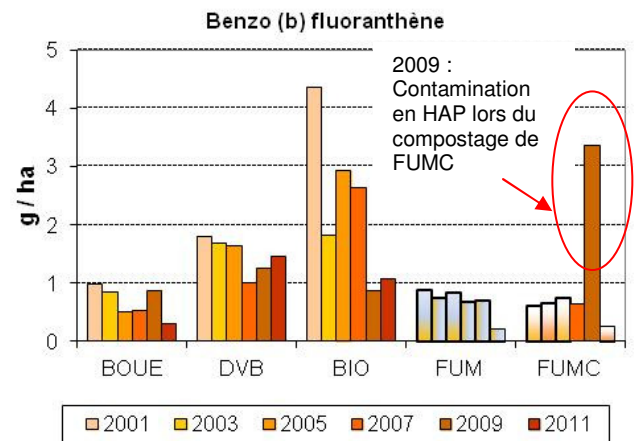


Figure 92 : Évolution des flux de Benzo (b) fluoranthène apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha (les histogrammes en couleurs dégradées présentent les flux calculés en utilisant les limites de quantification)

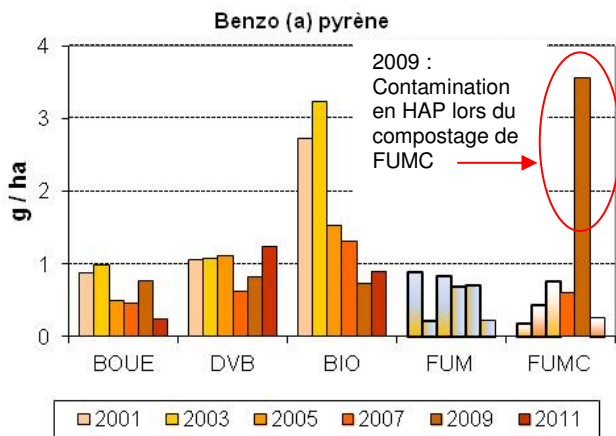


Figure 93 : Évolution des flux de Benzo (a) pyrène apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en g/ha (les histogrammes en couleurs dégradées présentent les flux calculés en utilisant les limites de quantification)

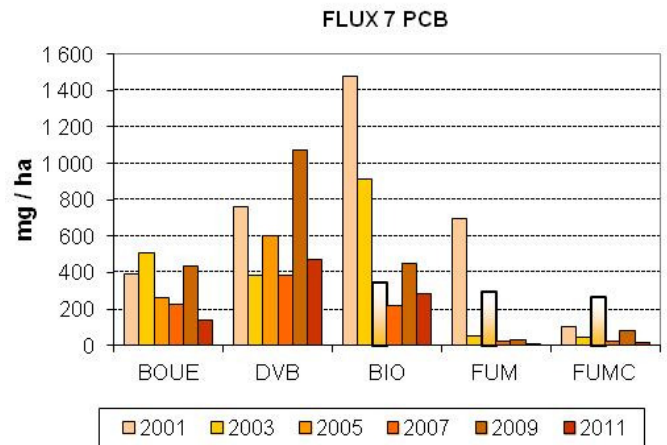


Figure 94 : Évolution des flux de PCB (sommés des 7 PCB visés par la réglementation) apportés par les PRO épandus de 2001 à 2011 en mg/ha (les histogrammes en couleurs dégradées présentent les flux calculés en utilisant les limites de quantification)



## 2.3 Effet des apports organiques sur les rendements de betterave en 2011

La betterave sucrière variété Python (SESVanderhave) a été semée le 5/04/2011 à la densité de 125000 graines/ha et la levée est observée le 17/04/2011.

### 2.3.1 Peuplements levée et récolte

Un comptage des plantes levées a été effectué le 25/05/2011 sur les trois placettes de chaque parcelle expérimentale. Le nombre de plantes levées est significativement supérieur dans le sous-essai non complétement en N minéral (117381 plantes/ha) par rapport au sous-essai complétement (114286 plantes/ha). Dans le sous-essai complétement, il n'y a pas de différence significative entre les traitements PRO, cependant les traitements FUM et FUMC présentent un nombre de plantes levées significativement supérieur au témoin (tableau 19, figure 95). Il n'y a pas d'explication logique à cette baisse du peuplement dans le Témoin fertilisé.

Lors de la récolte manuelle, un comptage des betteraves est également effectué sur chaque placette (tableau 19, figure 96). La différence entre les deux sous-essais persiste, le nombre de plantes récoltées étant significativement supérieur dans le sous-essai non complétement en N minéral par rapport au sous-essai complétement. Dans ce dernier, les traitements BOUE et FUMC présentent un nombre de plantes récoltées significativement supérieur au témoin.

Tableau 19 : Effet du type de produit organique et de la fertilisation minérale azotée sur le peuplement à la levée et le peuplement à la récolte

	Peuplement à la levée en plantes/ha				Peuplement à la récolte en plantes/ha			
	Avec engrais		Sans engrais		Avec engrais		Sans engrais	
	Moy.	ET	Moy.	Moy.	Moy.	ET	Moy.	ET
BOUE	115 238 <b>ab</b>	2 804	116 667	9 603	113333 <b>a &gt;T</b>	2333	113 571	9114
DVB	114 762 <b>ab</b>	3 159	116 190	4 115	110238 <b>ab</b>	5296	113 333	4600
BIO	112 619 <b>ab</b>	3 678	119 048	4 330	105476 <b>ab</b>	2112	117 619	5688
FUM	118 095 <b>a &gt;T</b>	5 553	116 667	5 526	110952 <b>ab</b>	5187	115 238	5443
FUMC	116 667 <b>a &gt;T</b>	1 650	117 857	1 429	112857 <b>a &gt;T</b>	3345	115 000	2381
TEM (T)	108 333 <b>b</b>	3 510	117 857	4 069	102857 <b>b</b>	4330	115 000	4690
Moyenne Générale	114 286	4520	117 381	4907	109 286	5271	114 960	5228
Probabilité ( $\alpha = 5\%$ )	<b>0,025</b>		0,98		<b>0,014</b>		0,92	
CV (%)	3,2 %		4,86 %		3,77 %		5,1 %	
Puissance ( $\alpha = 5\%$ )	78 %		7 %		82 %		10 %	

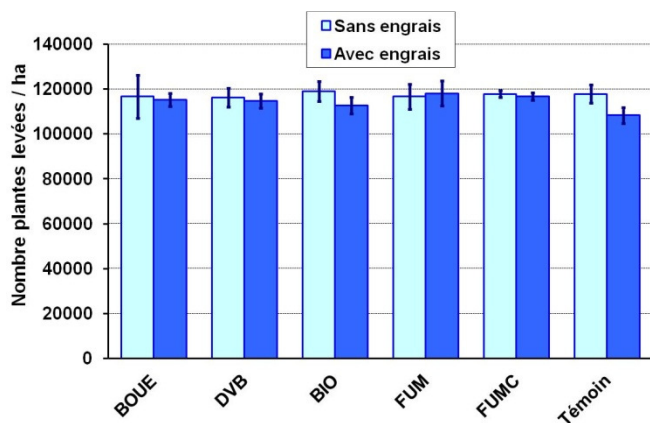


Figure 95 : Effet du type de produit organique et de la fertilisation minérale azotée sur le peuplement à la levée (25/05/2011)

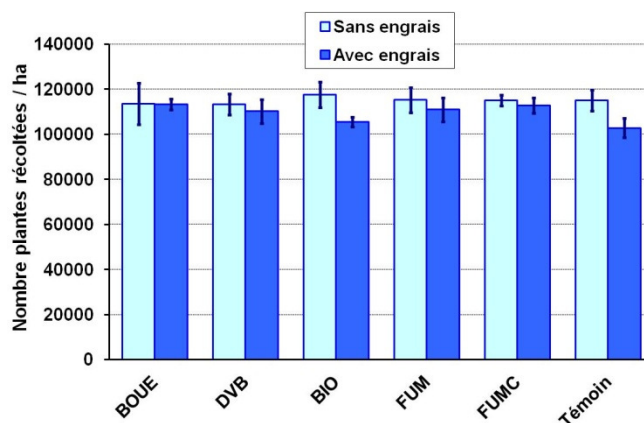


Figure 96 : Effet du type de produit organique et de la fertilisation minérale azotée sur le peuplement à la récolte (3/10/2011)

### 2.3.2 Rendements betteraves et biomasses de résidus de récolte

Pour le rendement net des betteraves en frais (décolletées et lavées), la complémentation en N, P et K minéral amène une augmentation significative de 6 T /ha (tableau 20). Cependant, la biomasse sèche des betteraves ne présente pas de différence entre les deux sous-essais. Cela est dû à une teneur en matière sèche supérieure dans le sous-essai non complétement en engrais. Le tonnage supérieur en frais à la récolte dans le sous-essai fertilisé est donc uniquement dû à une teneur en eau des betteraves plus élevée.

Lors de la précédente récolte de betteraves sur l'essai en 2007, le rendement moyen en frais était similaire (85 T /ha), mais le rendement moyen sec était supérieur (+ 1,5 T/ha) en raison d'une teneur en matière sèche des betteraves plus élevée.

Dans le sous-essai complétement en engrais minéral (figure 97), le traitement DVB génère un rendement net frais significativement supérieur aux autres traitements. Dans le sous-essai non complétement, les traitements BOUE et DVB permettent d'obtenir des rendements nets frais significativement supérieurs au témoin (figure 98). En termes de biomasse sèche de betteraves, les différences entre traitements ne sont pas significatives dans les deux sous-essais (figures 99 et 100).

Concernant les bouquets foliaires, coupés au champ et constituant les résidus de récolte, la complémentation en azote minéral augmente significativement la biomasse fraîche et sèche (tableau 21).

Dans le sous-essai fertilisé, le traitement témoin génère des biomasses de résidus de récolte, fraîche et sèche, significativement supérieures aux traitements PRO avec le classement TEM > FUM = FUMC = BIO > DVB = BOUE (figures 101 et 103).

Dans le sous-essai non fertilisé, les biomasses fraîches de résidus de récolte sont significativement supérieures au témoin dans tous les traitements PRO (figure 102). Les biomasses sèches y sont significativement supérieures au témoin pour les traitements BOUE et FUM (figure 104).

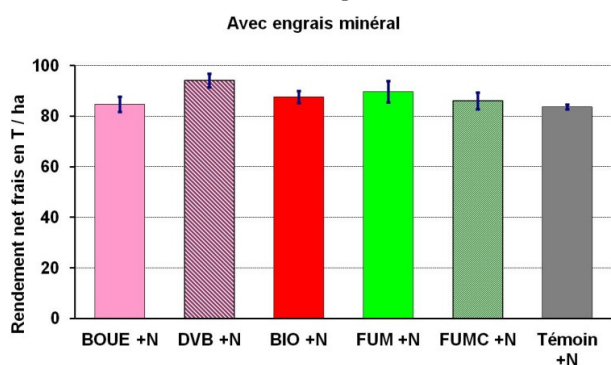
La complémentation en engrais minéraux a généré plus de biomasse de feuilles mais n'a pas eu d'influence sur le rendement sec des betteraves.

En l'absence de complémentation minérale, les apports de PRO augmentent la biomasse de résidus de récolte. Avec complémentation, la biomasse de résidus dans les traitements PRO est diminuée par rapport à un témoin fertilisé.

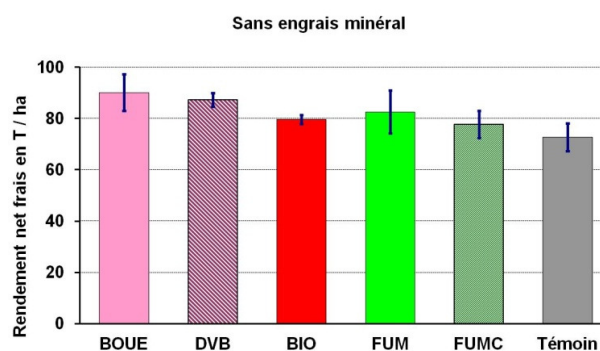
**Tableau 20** : Effet du type de produit organique et de la fertilisation minérale azotée sur le rendement net betteraves frais et la production de biomasse sèche de betteraves

	Rendement net betteraves frais <sup>(1)</sup> en T / ha				Biomasse sèche betteraves <sup>(1)</sup> en T / ha			
	Avec engrais		Sans engrais		Avec engrais		Sans engrais	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET
BOUE	84,8 <b>b</b>	2,9	90,1 <b>a &gt; T</b>	7,1	17,2	2,9	15,9	1,3
DVB	94,1 <b>a &gt; T</b>	2,6	87,3 <b>a &gt; T</b>	2,6	17	2,8	16,5	0,7
BIO	87,6 <b>b</b>	2,3	79,6 <b>ab</b>	1,7	15,5	1,2	15,7	0,1
FUM	89,7 <b>b &gt; T</b>	4,2	82,5 <b>ab</b>	8,4	16	2	16,1	1,3
FUMC	86,1 <b>b</b>	3,4	77,6 <b>ab</b>	5,3	15,6	1	15,5	0,8
TEM (T)	83,7 <b>b</b>	0,9	72,7 <b>b</b>	5,4	12,9	1,3	14,2	1,1
<b>Moyenne Générale</b>	<b>87,7</b>	<b>4,4</b>	<b>81,6</b>	<b>7,8</b>	<b>15,7</b>	<b>2,3</b>	<b>15,6</b>	<b>1,1</b>
Probabilité ( $\alpha = 5\%$ )	<b>0,00135</b>		<b>0,0093</b>		0,0865		0,072	
CV (%)	3,25%		7,28 %		12,7%		6,2 %	
Puissance ( $\alpha = 5\%$ )	95%		85%		63%		66%	

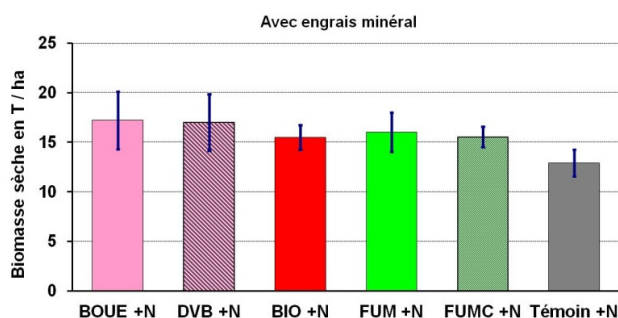
(1) Rendements betteraves nets en frais et en sec calculés d'après les résultats de la récolte manuelle des placettes (10,5 m<sup>2</sup>).



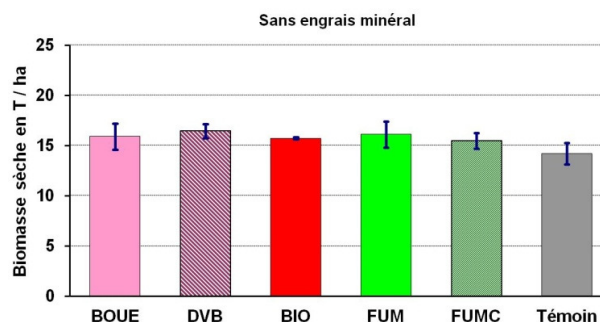
**Figure 97** : Effet du type de PRO sur le rendement betteraves net frais, sous-essai avec engrais, en T/ha



**Figure 98** : Effet du type de PRO sur le rendement betteraves net frais, sous-essai sans engrais, en T/ha



**Figure 99** : Effet du type de PRO sur la biomasse sèche des betteraves, sous-essai avec engrais, en T/ha

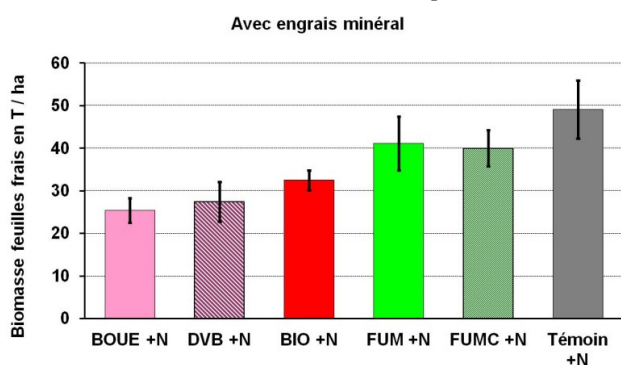


**Figure 100** : Effet du type de PRO sur la biomasse sèche des betteraves, sous-essai sans engrais, en T/ha

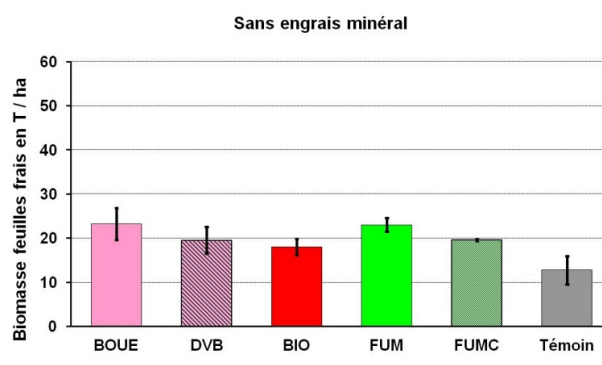
**Tableau 21 :** Effet du type de produit organique et de la fertilisation minérale azotée sur la biomasse des résidus de récolte (bouquets foliaires)

	Biomasse fraîche des résidus de récolte <sup>(1)</sup> en T/ha				Biomasse sèche des résidus de récolte <sup>(1)</sup> en T/ha			
	Avec engrais		Sans engrais		Avec engrais		Sans engrais	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET
BOUE	25,4 <b>c</b>	2,8	23,3 <b>a &gt; T</b>	3,6	4,06 <b>c &lt; T</b>	0,58	3,83 <b>a &gt; T</b>	0,59
DVB	27,5 <b>c</b>	4,7	19,5 <b>a &gt; T</b>	3	4,32 <b>c &lt; T</b>	0,52	3,41 <b>ab</b>	0,81
BIO	32,5 <b>bc</b>	2,3	18 <b>a</b>	1,8	5,21 <b>b &lt; T</b>	0,32	3,09 <b>ab</b>	0,44
FUM	41,1 <b>b</b>	6,3	23 <b>a &gt; T</b>	1,6	5,55 <b>b &lt; T</b>	0,67	3,73 <b>a &gt; T</b>	0,25
FUMC	40 <b>b</b>	4,2	19,6 <b>a &gt; T</b>	0,1	5,7 <b>b</b>	0,8	3,22 <b>ab</b>	0,16
TEM (T)	49,1 <b>a</b>	6,8	12,8 <b>b</b>	3,2	6,7 <b>a</b>	0,4	2,38 <b>b</b>	0,49
<b>Moyenne Générale</b>	<b>35,9</b>	<b>9,5</b>	<b>19,4</b>	<b>4,2</b>	<b>5,3</b>	<b>1</b>	<b>3,3</b>	<b>0,7</b>
Probabilité ( $\alpha = 5\%$ )	<b>0,00004</b>		<b>0,00089</b>		<b>0,00011</b>		<b>0,02</b>	
CV (%)	13,3 %		14,2 %		10,7 %		16,4 %	
Puissance ( $\alpha = 5\%$ )	99 %		96 %		99 %		79 %	

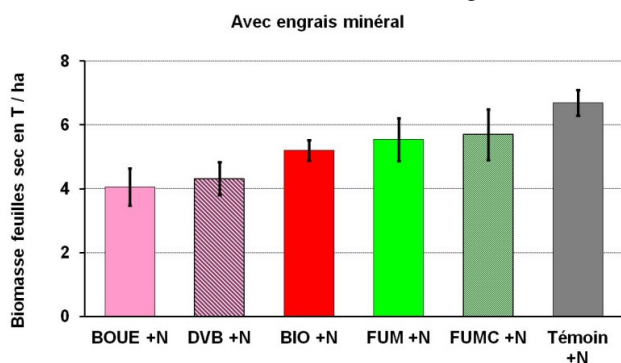
(1) Biomasses des résidus de récolte en frais et en sec calculées d'après les résultats de la récolte manuelle des placettes (10,5 m<sup>2</sup>).



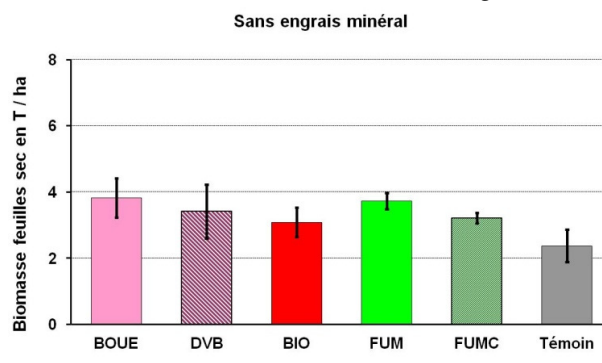
**Figure 101 :** Effet du type de PRO sur la biomasse fraîche des résidus de récolte, sous-essai avec engrais, en T/ha



**Figure 102 :** Effet du type de PRO sur la biomasse fraîche des résidus de récolte, sous-essai sans engrais, en T/ha



**Figure 103 :** Effet du type de PRO sur la biomasse sèche des résidus de récolte, sous-essai avec engrais, en T/ha



**Figure 104 :** Effet du type de PRO sur la biomasse sèche des résidus de récolte, sous-essai sans engrais, en T/ha

### 2.3.3 Richesses et rendements en sucre

La richesse en sucre en % de la matière fraîche des betteraves est égale entre les deux sous-essais (20,9 %). La complémentation minérale en NPK génère un rendement à 16% de sucre significativement supérieur de 8 T/ha, de même pour le rendement en sucre extractible supérieur de 1,2 T/ha (tableau 22). Cette augmentation est liée à une production de biomasse supérieure. Ce n'est pas le cas pour le traitement BOUE où la complémentation en engrais K ne conduit pas à plus de rendement à 16% car elle n'augmente pas le rendement frais.

Cette richesse en sucre, proche de 21% sur l'ensemble de l'essai, est élevée. Elle est bien supérieure à ce qui avait été mesuré en 2007 (17,2% en moyenne). La moyenne régionale fournie par la sucrerie d'Erstein est de 18,6% en 2011.

Une carence en azote peut parfois être la cause d'une hausse de la richesse en sucre. Ce n'est pas le cas sur cet essai, les rendements obtenus étant très élevés, ils ne manifestent pas un manque d'azote. Le potentiel de la parcelle semble élevé, et la fin d'été 2011 a connu des conditions climatiques particulières. Les mois de juillet et août pluvieux ont permis d'atteindre des biomasses élevées. Ensuite, le mois de septembre, qui a précédé la récolte, a été très sec et chaud. La sécheresse du sol a occasionné une augmentation de la teneur en sucre des betteraves durant cette période.

Dans le sous-essai complétement en N minéral, le taux de richesse en sucre, le rendement à 16% et le rendement en sucre sont significativement supérieurs au témoin dans tous les traitements PRO. Pour le rendement à 16% et le rendement en sucre, le traitement DVB est significativement supérieur aux autres traitements PRO sauf FUM, lui-même significativement supérieur au traitement BOUE.

Les richesses et rendements en sucre plus faibles dans le témoin avec engrais minéraux peuvent avoir deux explications. Une sur fertilisation du Témoin, avec 160 kg N / ha, corroborée par des reliquats plus élevés après récolte (cf. 2.5), a pu conduire à une baisse du taux de sucre. Une autre hypothèse pourrait être un retard de maturité par rapport aux traitements PRO, également lié à la fertilisation minérale. La migration des sucres des feuilles vers la betterave n'étant pas terminée à la récolte pour le témoin fertilisé. La biomasse de feuilles en MF et MS est en effet plus élevée dans le témoin.

Dans le sous-essai non complétement, les traitements BOUE, DVB et FUM permettent d'obtenir un rendement à 16% et un rendement en sucre significativement supérieurs au témoin.

Les résultats obtenus en 2011 sur l'essai de Colmar permettent de tirer des conclusions sur la gestion de la fertilisation d'une culture de betteraves incluant des produits résiduels organiques. L'épandage de PRO est compatible avec l'obtention d'excellents rendements en sucre.

Il semble également que le contexte pédologique de l'expérimentation, implantée sur des parcelles de limons profonds, permette d'économiser des engrais minéraux.

**Tableau 22 :** Effet du type de produit organique et de la fertilisation minérale azotée sur la richesse en sucre, le rendement à 16% de sucre, et le rendement sucre des betteraves

	Richesse en sucre <sup>(1)</sup> en % MB				Rendement à 16% de sucre <sup>(1)</sup> en T MB / ha				Rendement sucre extractible <sup>(1)</sup> en T / ha			
	Avec engrais		Sans engrais		Avec engrais		Sans engrais		Avec engrais		Sans engrais	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET
BOUE	20,9 <b>a &gt; T</b>	0,4	20,7	0,7	116 <b>c &gt; T</b>	4,5	123 <b>a &gt; T</b>	8,3	17,7 <b>c</b>	0,7	18,6 <b>a &gt; T</b>	1,3
DVB	21 <b>a &gt; T</b>	0,5	21,3	0,3	130 <b>a &gt; T</b>	1,7	123 <b>a &gt; T</b>	4	19,8 <b>a &gt; T</b>	0,3	18,6 <b>a &gt; T</b>	0,6
BIO	21,2 <b>a &gt; T</b>	0,4	21	0,3	123 <b>bc &gt; T</b>	4,8	110 <b>ab</b>	2,2	18,6 <b>bc &gt; T</b>	0,7	16,7 <b>ab</b>	0,3
FUM	21,1 <b>a &gt; T</b>	0,3	21,1	0,3	125 <b>ab &gt; T</b>	6,7	115 <b>a &gt; T</b>	10,3	19 <b>ab &gt; T</b>	1	17,4 <b>a &gt; T</b>	1,6
FUMC	21,2 <b>a &gt; T</b>	0,4	21	0,3	120 <b>bc &gt; T</b>	3,1	107 <b>ab</b>	7,8	18,2 <b>bc &gt; T</b>	0,5	16,3 <b>ab</b>	1,2
TEM (T)	19,8 <b>b</b>	0,3	20,4	0,1	108 <b>d</b>	1,2	97 <b>b</b>	7,2	16,6 <b>d</b>	0,2	14,8 <b>b</b>	1,1
Moyenne Générale	20,9	0,6	20,9	0,4	120	8	113	11,1	18,3	1,2	17,1	1,7
Probabilité ( $\alpha = 5\%$ )	<b>0,0003</b>		0,065		<b>0,00002</b>		<b>0,0017</b>		<b>0,00003</b>		<b>0,0022</b>	
CV (%)	1,6%		1,84%		3,2%		6,6%		3,1%		6,7%	
Puissance ( $\alpha = 5\%$ )	98%		67%		99%		94%		99%		93%	

(1) Richesse en sucre, rendement à 16% de sucre, et rendement sucre calculés d'après les résultats obtenus sur les échantillons de la récolte manuelle des placettes (10,5 m<sup>2</sup>).

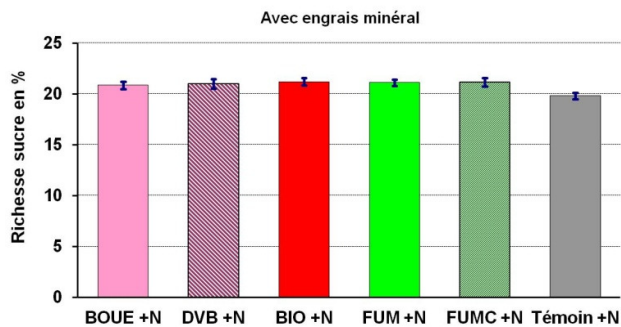


Figure 105 : Effet du type de PRO sur la richesse en sucre des betteraves, sous-essai avec engrais, en %

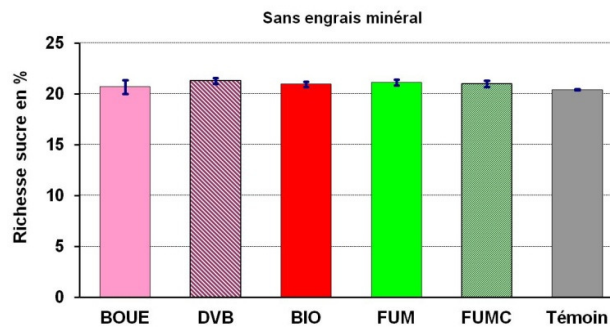


Figure 106 : Effet du type de PRO sur la richesse en sucre des betteraves, sous-essai sans engrais, en %

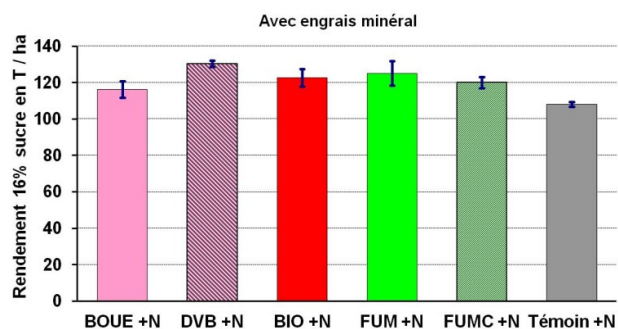


Figure 107 : Effet du type de PRO sur le rendement à 16% de sucre, sous-essai avec engrais, en T/ha

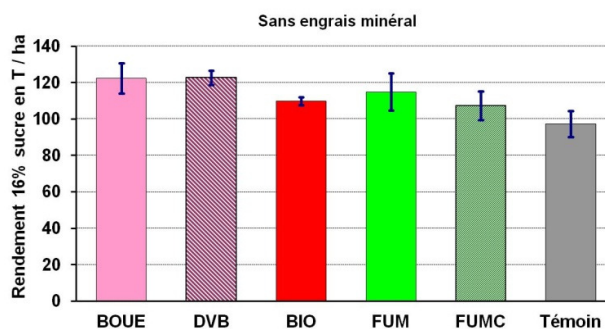


Figure 108 : Effet du type de PRO sur le rendement à 16% de sucre, sous-essai sans engrais, en T/ha

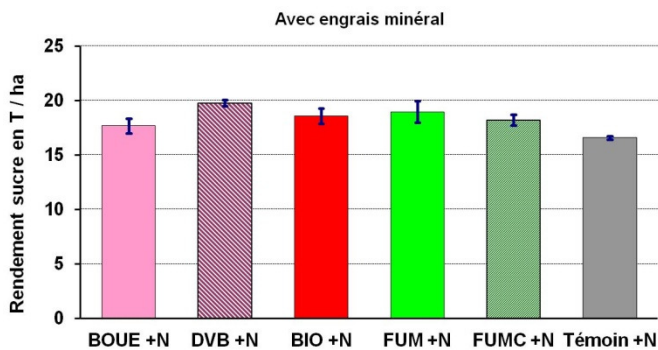


Figure 109 : Effet du type de PRO sur le rendement en sucre extractible, sous-essai avec engrais, en T/ha

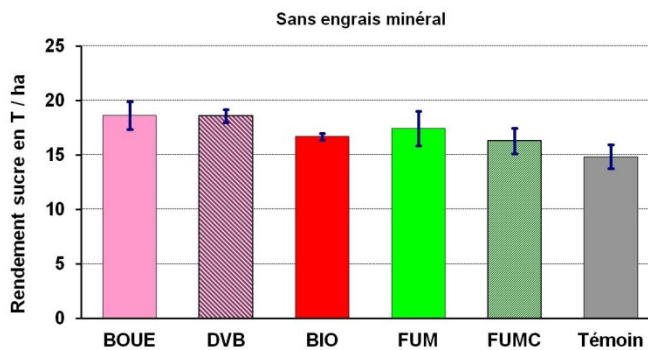


Figure 110 : Effet du type de PRO sur le rendement en sucre extractible, sous-essai sans engrais, en T/ha

## 2.4 Effet des apports organiques sur la qualité des produits récoltés

Les analyses en éléments majeurs ainsi qu'en Fe, Mn, Zn et Cu ont été réalisées sur les échantillons des deux sous-essais, complétement et non complétement en engrais minéral. Les autres ETM (Al, B, Mo, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Se, As, Hg) sont analysés uniquement dans le sous-essai complétement.

Une synthèse des différences significatives entre traitements est présentée dans les tableaux 35 à 38.

### 2.4.1 Concentration des betteraves en éléments totaux

Les concentrations en éléments dans les betteraves sont présentées dans les tableaux 23 à 25 et sur les figures 111 à 129.

Comme cela a été décrit en 1.6.2, la première série d'échantillons de pulpe de betterave du sous-essai complétement en engrais minéral a été contaminée en Cr, Ni, Fe, Co et Mo lors du broyage. Les résultats présentés pour les éléments Cr, Ni, Fe, Co et Mo sont issus de l'analyse sur la pulpe fraîche avec une correction de la teneur en MS. Les résultats présentés, en orange dans les tableaux, ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

Nouvelle méthode de préparation et de minéralisation des pulpes de betterave à mettre en place avec l'USRAVE (INRA Bordeaux) pour de prochaines campagnes betterave :

L'homogénéisation de la pulpe de betterave après congélation étant problématique (nouveau broyage sur blender, non contaminant : sans couteaux inox ; et prise d'essai sur un mélange pâteux/liquide non homogène), nous proposons de faire le prélèvement de pulpe pour analyse directement à la sortie de la râpeuse. Ces prélèvements représenteront chacun 5 g de matière fraîche. Des répétitions seront faites. Au final seront fournis au laboratoire, pour chaque parcelle :

- 3 échantillons d'environ 5 g de pulpe de betterave qui seront séchés à 103°C puis calcinés (analyse des éléments majeurs et en traces)
- 1 échantillon d'environ 5 g qui sera séché à 50 °C et minéralisé par la méthode habituelle (analyse de Se).
- 1 échantillon d'environ 5 g qui sera séché à 50 °C (analyse de Hg).

Des essais de faisabilité (validité d'une prise d'essai directe en sortie de pulpeuse) devront être réalisés sur des échantillons de test avant mise en production de cette nouvelle méthode.

#### 2.4.1.1 Éléments majeurs

La complémentation minérale amène une augmentation statistiquement significative de la concentration des betteraves en **N** (avec engrais : 6,5 g/kg ; sans engrais : 3,9 g/kg), en **K**, en **Mg**, et en **Na**.

Dans le sous-essai complétement en engrais, le traitement Témoin présente des teneurs en **N** significativement supérieures à tous les traitements PRO. Dans le sous-essai non complétement, les teneurs en N dans le traitement BOUE sont significativement supérieures aux autres traitements.

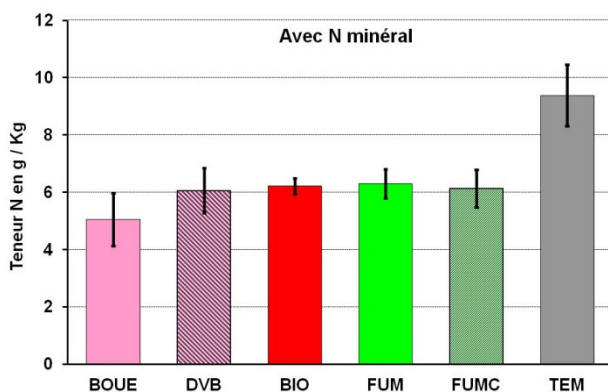


Figure 111 : Teneurs en N des betteraves en g/kg MS, sous-essai avec engrais

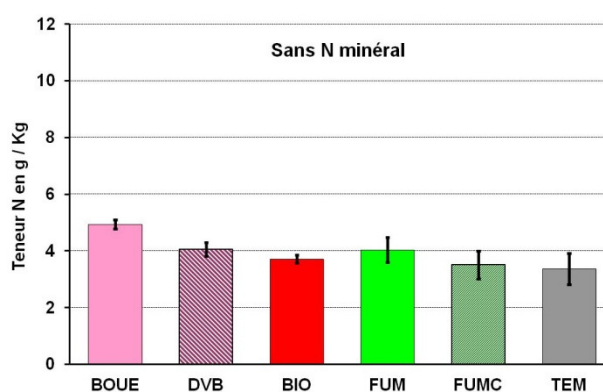


Figure 112 : Teneurs en N des betteraves en g/kg MS, sous-essai sans engrais



Dans le sous-essai complétement en engrais, il n'y a pas d'effet significatif des PRO sur les teneurs en **P** dans les betteraves. Dans le sous-essai non complétement, les teneurs en P sont significativement supérieures au Témoin pour tous les traitements PRO sauf BIO et se classent dans l'ordre BOUE ≥ DVB ≥ FUM = FUMC ≥ BIO ≥ TEM.

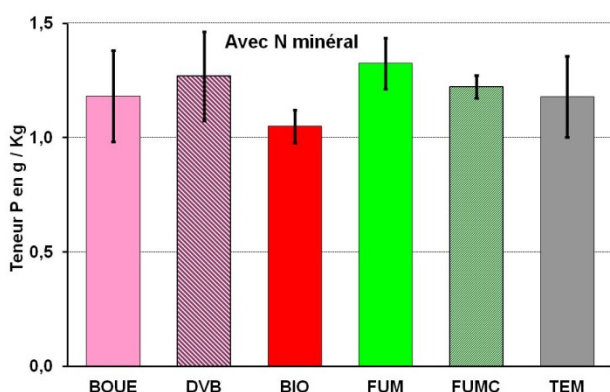


Figure 113 : Teneurs en P des betteraves en g/kg MS, sous-essai avec engrais

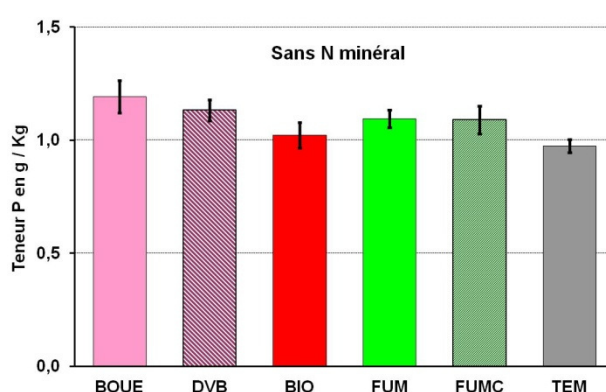


Figure 114 : Teneurs en P des betteraves en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, Les teneurs en **K** dans les traitements FUM, Témoin et FUMC sont significativement supérieures au traitement BOUE. Dans le sous-essai non complétement, les concentrations en K sont significativement supérieures au Témoin pour tous les traitements PRO.

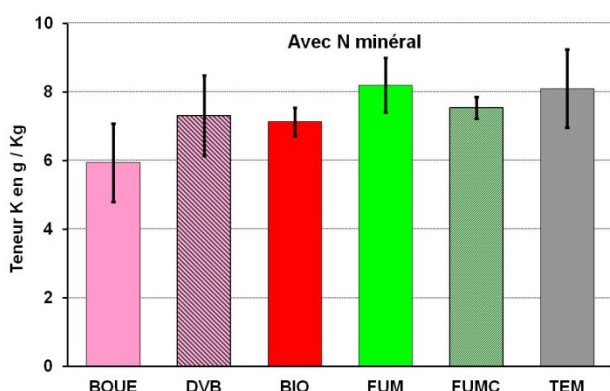


Figure 115 : Teneurs en K des betteraves en g/kg MS, sous-essai avec engrais

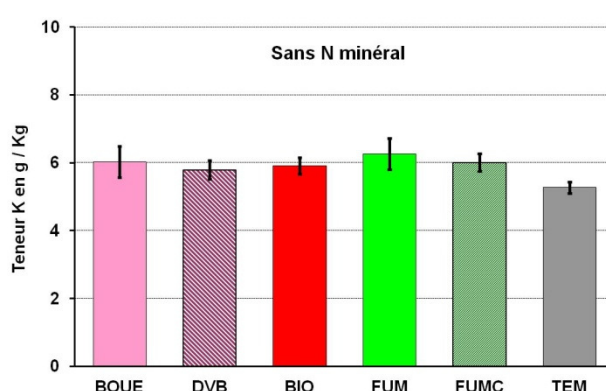


Figure 116 : Teneurs en K des betteraves en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans les deux sous-essais, les teneurs en **Ca** ne se différencient pas significativement entre traitements.

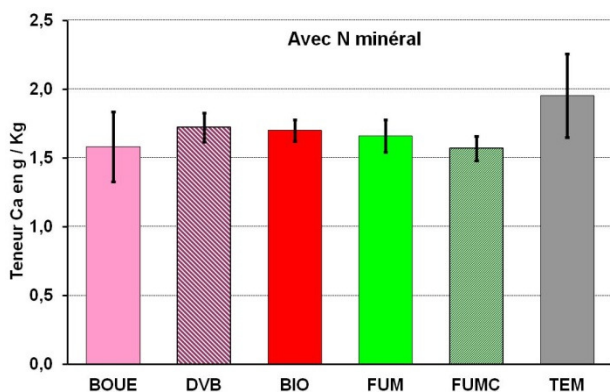


Figure 117 : Teneurs en Ca des betteraves en g/kg MS, sous-essai avec engrais

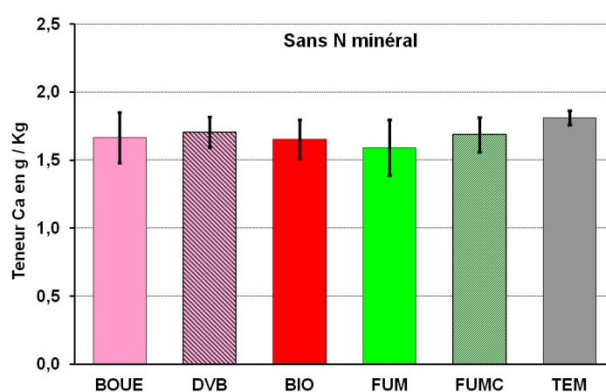


Figure 118 : Teneurs en Ca des betteraves en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, le traitement Témoin présente des teneurs en **Mg** significativement supérieures à tous les traitements PRO. Les teneurs dans les traitements FUM et FUMC sont également significativement supérieures au traitement BOUE. Dans le sous-essai non complétement, il n'y a pas d'effet significatif des PRO sur les teneurs en Mg dans les betteraves.

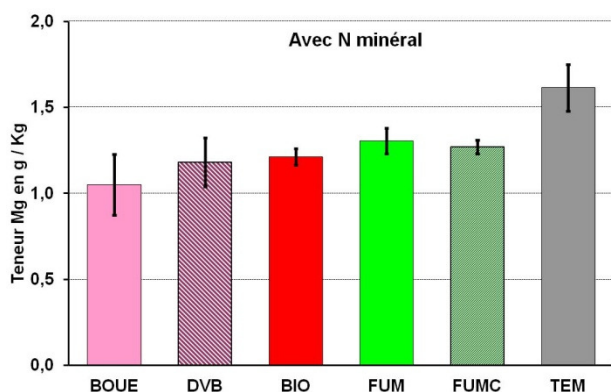


Figure 119 : Teneurs en Mg des betteraves en g/kg MS, sous-essai avec engrais

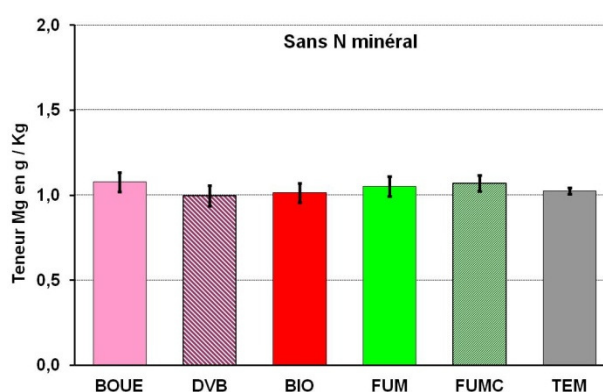


Figure 120 : Teneurs en Mg des betteraves en g/kg MS, sous-essai sans engrais

La complémentation minérale augmente fortement les teneurs en **Na** des différents traitements avec des écarts-types élevés entre répétitions.

Dans le sous-essai complétement en engrais, les concentrations en Na du traitement BOUE sont significativement inférieures à celles de tous les autres traitements. Dans le sous-essai non complétement, les teneurs dans le traitement BOUE sont significativement supérieures aux autres traitements.

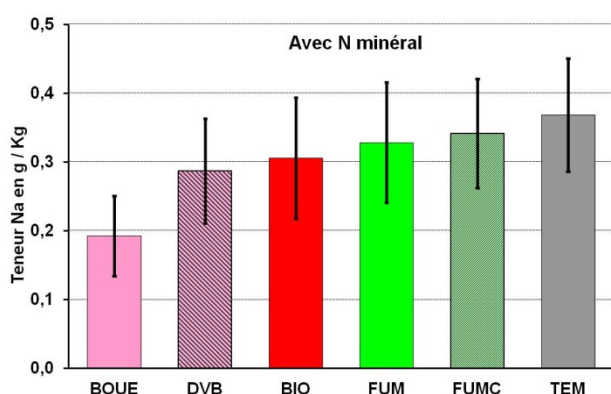


Figure 121 : Teneurs en Na des betteraves en g/kg MS, sous-essai avec engrais

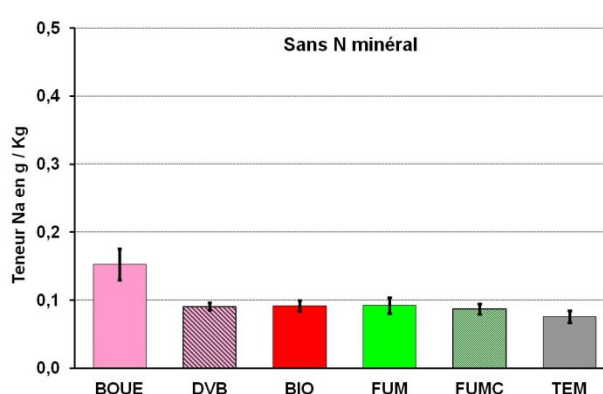


Figure 122 : Teneurs en Na des betteraves en g/kg MS, sous-essai sans engrais

#### 2.4.1.2 Éléments traces

Seuls les éléments Fe, Mn, Zn et Cu sont analysés dans les deux sous-essais, avec et sans N minéral. Les éléments Al, B, Mo, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Se, As et Hg sont analysés dans les échantillons du sous-essai avec complémentation minérale.

Dans les betteraves du sous-essai complétement, les analyses des éléments Mo, Se, Hg et As présentent des résultats inférieurs aux limites de quantification. Les moyennes et écarts-types présentés utilisent ces résultats qui sont donnés à titre indicatif et ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

Suite au problème de contamination des échantillons et à la reprise d'analyse, les teneurs en Fe, Mo, Cr, Ni, et Co dans le sous-essai avec engrais minéral ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

Dans le sous-essai non complétement en engrais, les teneurs en **Fe** dans le traitement BOUE sont significativement supérieures à celles des autres traitements.

Dans le sous-essai complétement en engrais, les concentrations en **Mn** ne présentent pas de différences significatives entre traitements. Dans le sous-essai non complétement, les teneurs dans le Témoin sont supérieures aux traitements FUM et FUMC et se classent dans l'ordre TEM ≥ BOUE ≥ DVB = BIO ≥ FUMC ≥ FUM.

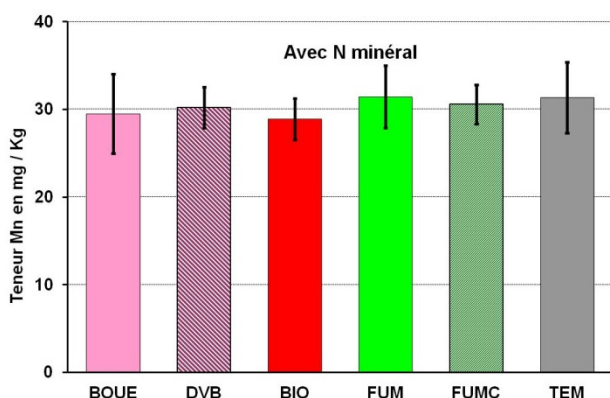


Figure 123 : Teneurs en Mn des betteraves en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

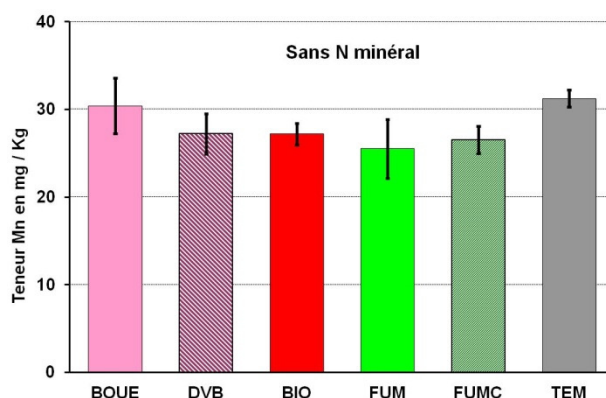


Figure 124 : Teneurs en Mn des betteraves en mg/kg MS, sous-essai sans engrais

La complémentation minérale amène une augmentation statistiquement significative de la concentration des betteraves en **Zn**. Dans le sous-essai complétement en engrais minéral, les concentrations dans les traitements Témoin et FUMC sont significativement supérieures à celles du traitement BOUE. Dans le sous-essai non complétement, il n'y a pas d'effet significatif des PRO sur les teneurs dans les betteraves.

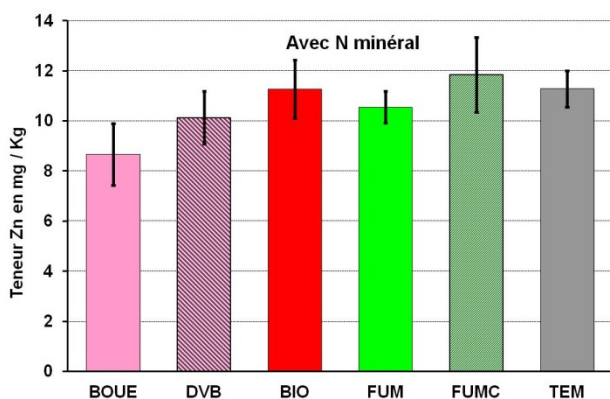


Figure 125 : Teneurs en Zn des betteraves en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

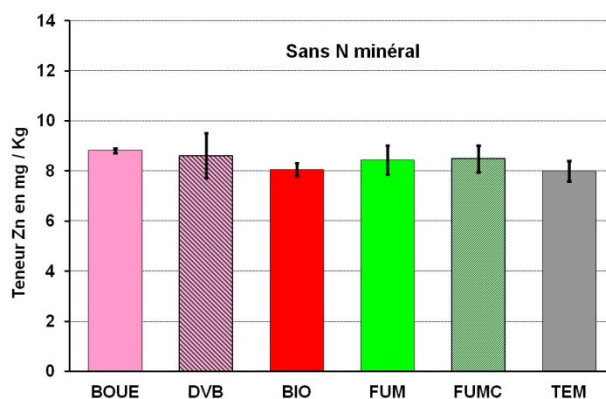


Figure 126 : Teneurs en Zn des betteraves en mg/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, les concentrations en **Cu** ne présentent pas de différences significatives entre traitements. Dans le sous-essai non complétement, les teneurs dans le traitement BOUE sont significativement supérieures au Témoin.

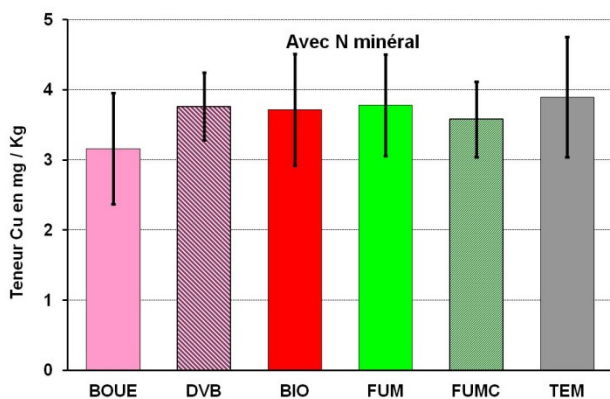


Figure 127 : Teneurs en Cu des betteraves en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

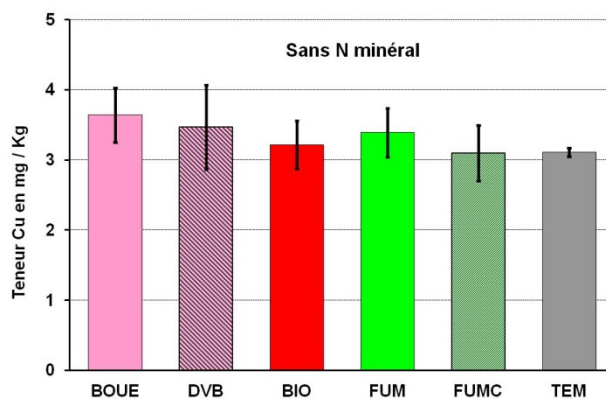
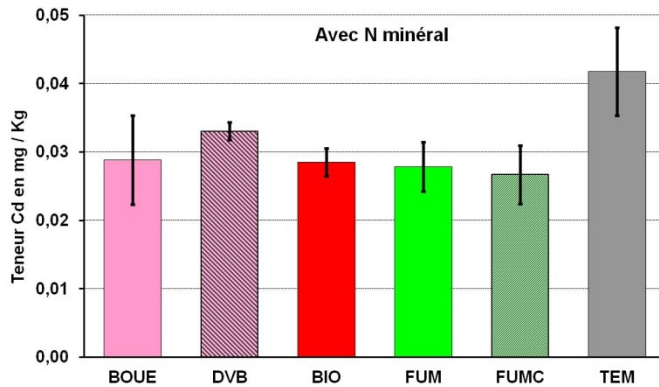


Figure 128 : Teneurs en Cu des betteraves en mg/kg MS, sous-essai sans engrais

Les teneurs en **As** dans la pulpe de betteraves présentent plusieurs valeurs inférieures à la limite de quantification (0,03 mg/kg MS) dans tous les traitements sauf dans le témoin dont les résultats des quatre répétitions sont supérieurs à cette limite. Aucune analyse statistique ne peut-être effectuée sur ces données.

Les teneurs en **Cd** dans le Témoin sont significativement supérieures à celles de tous les traitements PRO.



*Figure 129 : Teneurs en Cd des betteraves en mg/kg MS, sous-essai avec engrais*

Tableau 23 : Teneurs moyennes et écarts-types des **betteraves** en éléments majeurs totaux en 2011, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

	<b>N</b>		<b>P</b>		<b>K</b>		<b>Ca</b>		<b>Mg</b>		<b>Na</b>														
	N1>N0				N1>N0				N1>N0		N1>N0														
	g / kg de matière sèche																								
<b>Engrais</b>	sans		avec		sans		avec		sans		avec		sans		avec										
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET									
<b>BOUE</b>	4,9	0,2	5,1	0,9	1,19	0,07	1,18	0,20	6	0,5	5,9	1,1	1,67	0,19	1,58	0,25	1,08	0,06	1,05	0,18	0,153	0,023	0,193	0,058	
	<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>a &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>				<b>c &lt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>
<b>DVB</b>	4,1	0,2	6,1	0,8	1,13	0,05	1,27	0,19	5,8	0,3	7,3	1,2	1,71	0,11	1,72	0,11	1	0,06	1,18	0,14	0,091	0,005	0,287	0,076	
	<b>b</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>ab &gt;T</b>				<b>a</b>		<b>ab</b>				<b>bc &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>bc &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>a</b>		<b>a</b>
<b>BIO</b>	3,7	0,1	6,2	0,3	1,02	0,06	1,05	0,07	5,9	0,2	7,1	0,4	1,66	0,14	1,7	0,08	1,01	0,06	1,21	0,05	0,092	0,008	0,305	0,088	
	<b>b</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>cd</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>ab</b>				<b>bc &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>bc &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>a</b>		<b>a</b>
<b>FUM</b>	4	0,4	6,3	0,5	1,1	0,04	1,33	0,11	6,3	0,5	8,2	0,8	1,59	0,21	1,66	0,116	1,05	0,06	1,31	0,08	0,092	0,012	0,328	0,087	
	<b>b</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>bc &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>a</b>				<b>b &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>a</b>		<b>a</b>
<b>FUMC</b>	3,5	0,5	6,1	0,6	1,09	0,06	1,22	0,05	6	0,3	7,5	0,3	1,69	0,13	1,57	0,09	1,07	0,05	1,27	0,04	0,088	0,008	0,341	0,079	
	<b>b</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>bc &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>a</b>				<b>b &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>a</b>		<b>a</b>
<b>TEM (T)</b>	3,4	0,5	9,4	1,1	0,97	0,03	1,18	0,18	5,3	0,2	8,1	1,1	1,81	0,05	1,95	0,3	1,02	0,02	1,62	0,14	0,076	0,009	0,368	0,082	
	<b>b</b>		<b>a</b>		<b>d</b>				<b>b</b>		<b>a</b>				<b>a</b>		<b>b</b>		<b>a</b>		<b>b</b>		<b>a</b>		<b>a</b>
<b>Probabilité</b>	<b>0,00087</b>		<b>0</b>		<b>0,00025</b>		0,11195		<b>0,00339</b>		<b>0,00932</b>		0,45234		0,06999		0,08913		<b>0,00004</b>		<b>0,00001</b>		<b>0,00797</b>		
<b>CV</b>	10,18%		9,07%		4,5%		10,6%		4,71%		10,3%		8,64%		10,17%		4,01%		7,97%		12,4%		18,35%		
<b>Puissance</b>	96%		99%		98%		59%		91%		85%		26%		66%		63%		99%		99%		86%		

Tableau 24 : Teneurs moyennes et écarts-types des **betteraves** en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

Engrais	Fe		Mn		Zn		Cu									
					N1>N0											
	mg / kg de matière sèche															
	sans		avec <sup>(2)</sup>		sans		avec		sans		avec					
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET				
BOUE	70,5	10,9	56,3	22,2	30,4	3,2	29,5	4,5	8,8	0,1	8,7	1,2	3,64	0,39	3,16	0,79
	<b>a &gt;T</b>				<b>ab</b>				<b>b &lt;T</b>		<b>a &gt;T</b>					
DVB	<u>44,8</u>	<u>6,1</u>	<u>38,8</u>	<u>4,1</u>	27,2	2,3	30,2	2,3	8,6	0,9	10,1	1,1	3,47	0,60	3,77	0,48
	<b>b</b>				<b>abc &lt;T</b>				<b>ab</b>		<b>a</b>					
BIO	36	15,2	47,2	4,3	27,2	1,2	28,9	2,4	8,1	0,3	11,3	1,2	3,22	0,34	3,72	0,8
	<b>b</b>				<b>abc &lt;T</b>				<b>ab</b>		<b>a</b>					
FUM	35,2	5,5	60,6	9,9	25,5	3,4	31,4	3,6	8,4	0,6	10,6	0,6	3,39	0,34	3,78	0,72
	<b>b</b>				<b>c &lt;T</b>				<b>ab</b>		<b>a</b>					
FUMC	52	12,5	63,2	20	26,5	1,5	30,6	2,2	<u>8,5</u>	<u>0,5</u>	<u>11,8</u>	<u>1,5</u>	3,1	0,39	3,58	0,54
	<b>b</b>				<b>bc &lt;T</b>				<b>a</b>		<b>a</b>					
TEM (T)	44,7	10,7	76,2	19,3	31,3	1	31,4	4	8	0,4	<u>11,3</u>	<u>0,7</u>	3,11	0,06	3,9	0,86
	<b>b</b>				<b>a</b>						<b>ab</b>		<b>a</b>			
Probabilité	0,00151				0,00637		0,85034		0,31703		0,03299		0,03871		0,68316	
CV	20,31 %				7,19%		10,71%		6,63%		11,46%		7,34%		17,99%	
Puissance	95%				88%		12%		33%		76%		73%		18%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

(2) Lors de la première série d'analyse, sur des échantillons séchés et broyés, les échantillons des traitements avec complémentation minérale ont été contaminés en Fer lors du broyage. Une seconde analyse a été effectuée sur des échantillons frais, cependant la mesure de la teneur en matière sèche n'a pu être réalisée correctement. Les résultats présentés sont issus de la deuxième série d'analyse, sur échantillons frais, avec une correction de la teneur en MS.

Aucune analyse statistique n'est effectuée sur ces résultats.

Tableau 25 : Teneurs moyennes et écarts-types des **betteraves** en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur le sous-essai fertilisé en engrais minéral

	Al		B		Mo <sup>(2)</sup>		Cd		Cr <sup>(2)</sup>		Ni <sup>(2)</sup>		Pb		Co <sup>(2)</sup>		Se		As		Hg			
					LQ <0,04										LQ < 0,3		LQ < 0,03		LQ < 10					
	mg / kg de matière sèche																						µg/kg MS	
Engrais	avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec			
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET		
<b>BOUE</b>	94,3	35,7	9,4	2,7	0,022	0,006	0,029	0,007	0,22	0,05	0,21	0,04	0,38	0,12	0,018	0,015	0,028	0,004	0,024	0,011	0,45	0,42		
							<b>b &lt; T</b>													(1 valeur > LQ)				
<b>DVB</b>	96,3	60,6	11	3	0,025	0,008	0,033	0,001	<u>0,12</u>	<u>0,02</u>	<u>0,14</u>	<u>0,02</u>	0,41	0,16	<u>0,017</u>	<u>0,021</u>	0,024	0,007	0,029	0,015	0,68	0,93		
							<b>b &lt; T</b>													(2 valeurs > LQ)				
<b>BIO</b>	78,5	18,5	11,2	3	0,036	0,006	0,029	0,002	<u>0,21</u>	<u>0,01</u>	<u>0,17</u>	<u>0,01</u>	0,41	0,07	0,015	0,016	0,024	0,005	0,025	0,004	0,23	0,16		
							<b>b &lt; T</b>													(1 valeur > LQ)				
<b>FUM</b>	120,5	36,6	11	2,3	0,033	0,004	0,028	0,004	0,28	0,13	0,20	0,06	0,35	0,03	0,024	0,005	0,027	0,005	0,034	0,013	0,64	0,57		
							<b>b &lt; T</b>													(3 valeurs > LQ)				
<b>FUMC</b>	98,3	20,3	10,4	0,8	0,036	0,004	0,027	0,004	0,28	0,1	0,21	0,04	0,47	0,08	0,027	0,022	0,031	0,005	0,03	0,004	0,26	0,25		
							<b>b &lt; T</b>													(2 valeurs > LQ)				
<b>TEM (T)</b>	162	36,5	10,8	1,5	0,025	0,004	0,042	0,006	0,27	0,04	0,28	0,06	0,49	0,05	0,031	0,02	0,037	0,009	0,045	0,01	0,32	0,27		
							<b>a</b>													(toutes valeurs > LQ)				
<b>Probabilité</b>	0,05477		0,90443				<b>0,00123</b>						0,25551											
<b>CV</b>	32,52%		22,41%				13,38%						21,44%											
<b>Puissance</b>	69%		10%				95%						37%											

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

(2) Lors de la première série d'analyse, sur des échantillons séchés et broyés, les échantillons des traitements avec complémentation minérale ont été contaminés en Mo, Cr, Ni et Co lors du broyage. Une seconde analyse a été effectuée sur des échantillons frais, cependant la mesure de la teneur en matière sèche n'a pu être réalisée correctement. Les résultats présentés sont issus de la deuxième série d'analyse, sur échantillons frais, avec une correction de la teneur en MS. Aucune analyse statistique n'est effectuée sur ces résultats.

## 2.4.2 Concentrations des résidus de récolte en éléments totaux

Les résidus de récolte des betteraves sont les bouquets foliaires découpés par l'arracheuse et laissés au champ au moment de la récolte. Dans le cadre de cette expérimentation, les bouquets foliaires sont coupés manuellement sur les placettes de récolte, puis séchés, broyés et analysés. Les concentrations dans les résidus de récolte sont présentées dans les tableaux 26 à 28 et sur les figures 130 à 151.

### 2.4.2.1 Éléments majeurs

La complémentation minérale génère une augmentation significative des concentrations en **N** et **Na** dans les résidus de récolte de betterave. Par contre les teneurs en **P** et **K** sont significativement supérieures dans le sous-essai sans engrais minéral, sans doute en raison d'un effet de dilution de ces éléments dans la partie complétementée, en raison des biomasses de bouquets foliaires plus élevées.

Dans le sous-essai non complétementé en engrais, les concentrations en éléments majeurs dans les résidus de récolte ne présentent pas de différences significatives sauf pour **Na**.

Dans le sous-essai complétementé en engrais, les teneurs en **N** dans les résidus de récolte du traitement Témoin sont significativement supérieures à celles des traitements PRO, comme cela avait été constaté dans les betteraves. Dans le sous-essai non complétementé, les apports de PRO n'entraînent pas de différence significative, bien que les teneurs en N dans le traitement BOUE soient supérieures aux autres traitements de 2 à 3,4 g/kg.

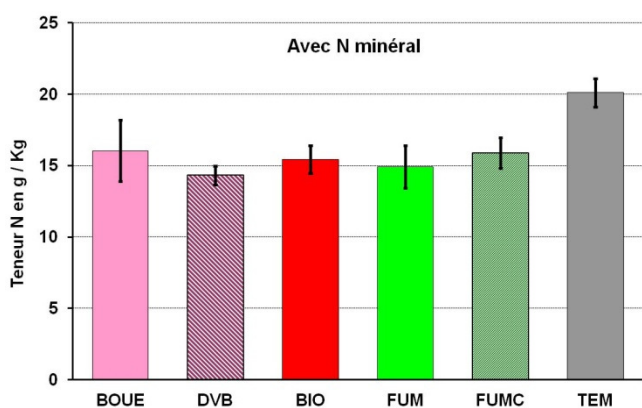


Figure 130 : Teneurs en N des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai avec engrais

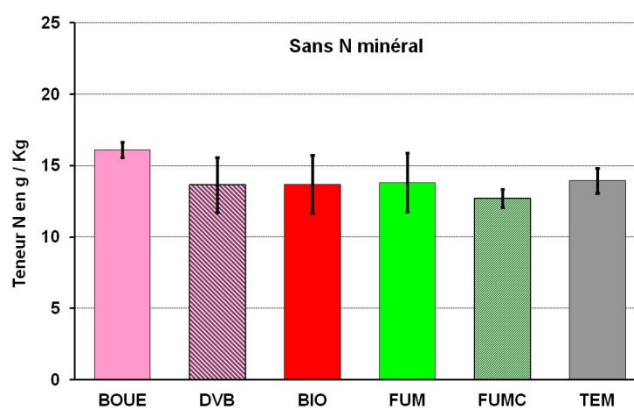


Figure 131 : Teneurs en N des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétementé en engrais, Les concentrations en **P** dans le traitement BOUE sont significativement supérieures aux autres traitements.

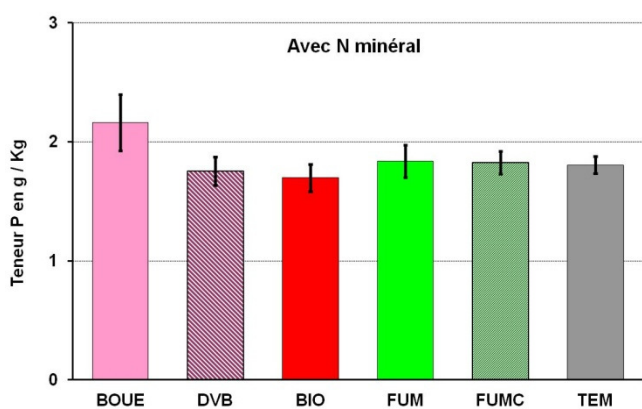


Figure 132 : Teneurs en P des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai avec engrais

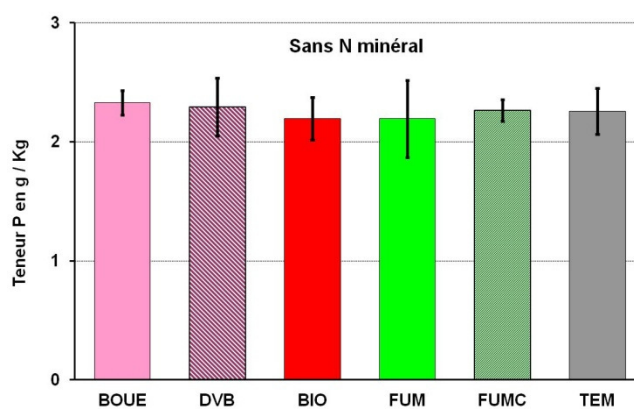


Figure 133 : Teneurs en P des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai sans engrais



Dans le sous-essai complétement en engrais, Les concentrations en **K** sont significativement supérieures au Témoin dans tous les traitements PRO et se classent dans l'ordre BOUE ≥ DVB = BIO = FUM ≥ FUMC > TEM.

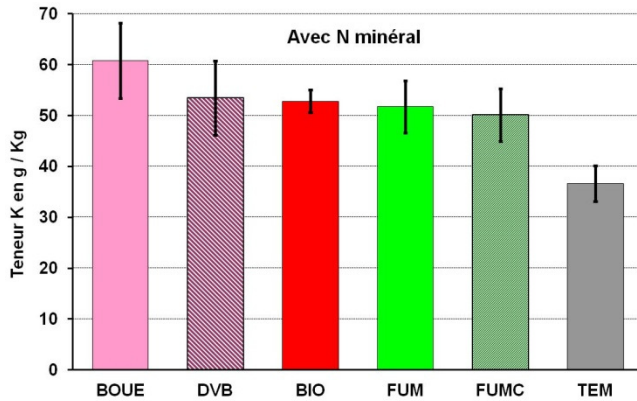


Figure 134 : Teneurs en K des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai avec engrais

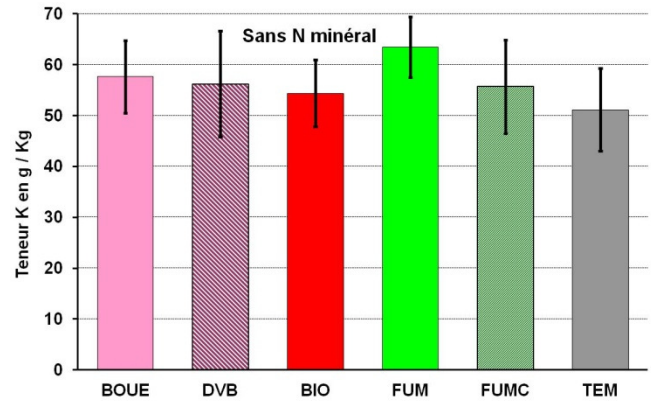


Figure 135 : Teneurs en K des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, Les teneurs en **Ca** sont significativement supérieures au Témoin dans le traitement BOUE et se classent dans l'ordre BOUE ≥ DVB ≥ BIO ≥ FUMC = TEM ≥ FUM.

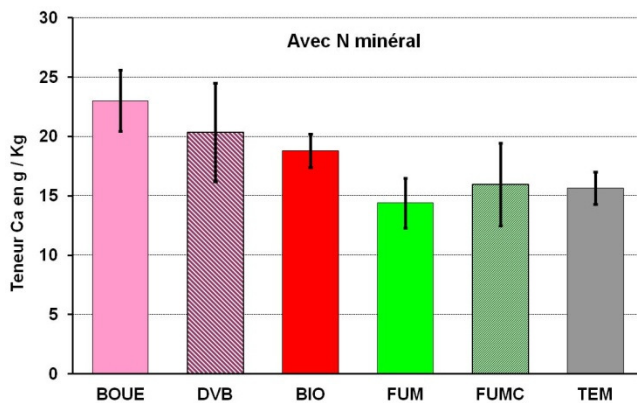


Figure 136 : Teneurs en Ca des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai avec engrais

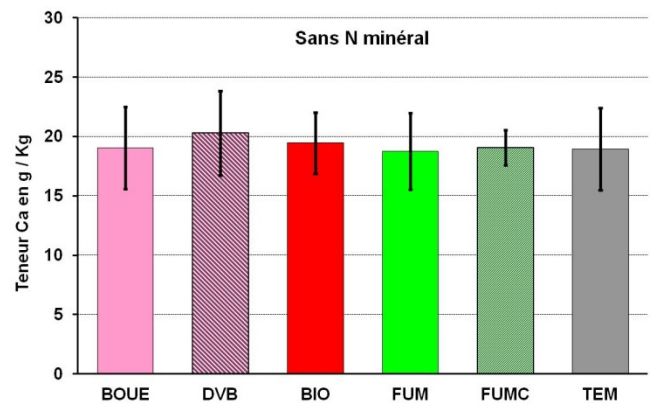


Figure 137 : Teneurs en Ca des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans les deux sous-essais, il n'y a pas d'effet significatif des traitements sur les teneurs en **Mg**.

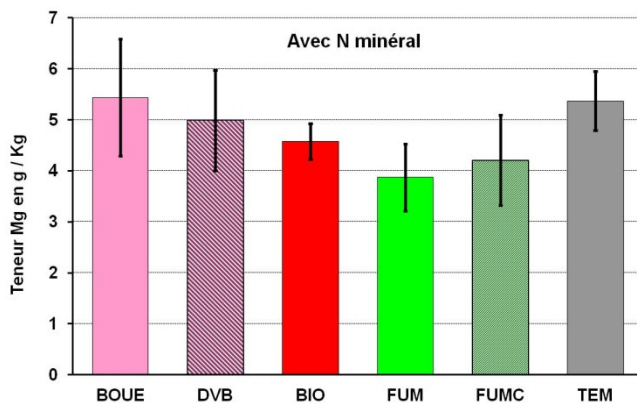


Figure 138 : Teneurs en Mg des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai avec engrais

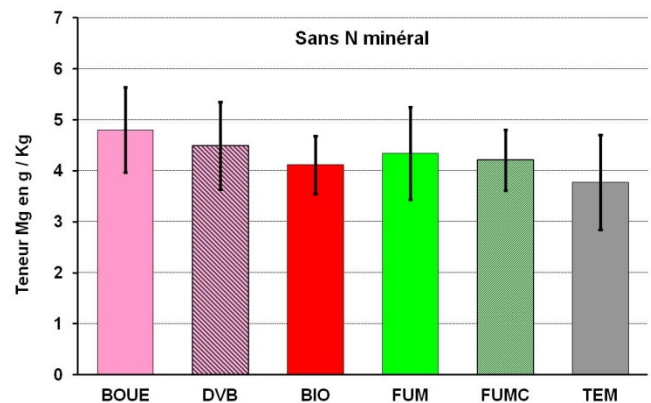


Figure 139 : Teneurs en Mg des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, les teneurs en **Na** dans le traitement FUMC sont significativement supérieures au Témoin. Dans le sous-essai non complétement en engrais, les concentrations en **Na** dans les résidus de récolte sont significativement supérieures au Témoin dans tous les traitements PRO et se classent de la manière suivante : BOUE ≥ FUM = BIO ≥ DVB = FUMC > TEM.

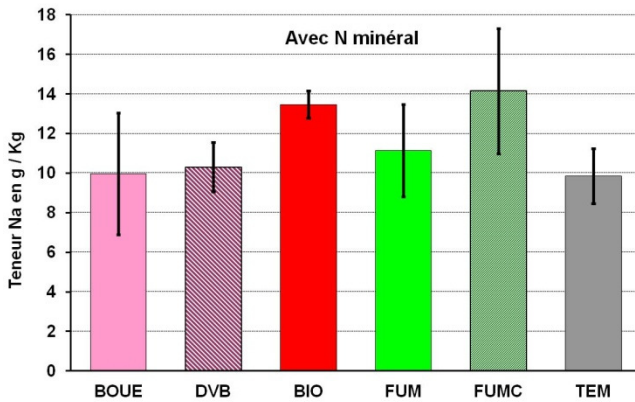


Figure 140 : Teneurs en Na des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai avec engrais

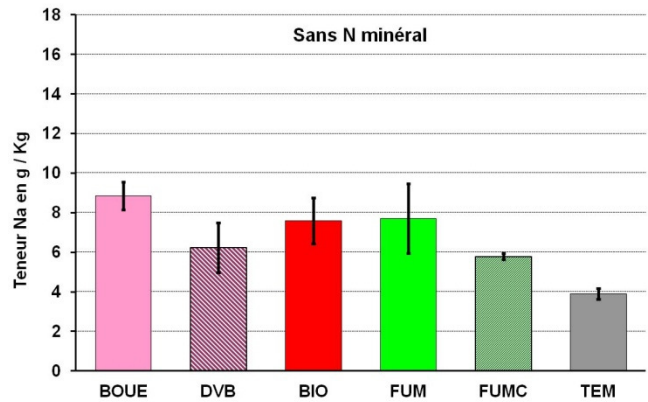


Figure 141 : Teneurs en Na des résidus de récolte en g/kg MS, sous-essai sans engrais

#### 2.4.2.2 Éléments traces

Les valeurs de concentrations en éléments traces dans les résidus de récolte sont toutes supérieures aux limites de quantification du laboratoire. Les éléments Fe, Mn, Zn et Cu sont analysés dans les deux sous-essais, avec et sans complémentation minérale. Les éléments Al, B, Mo, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Se, As et Hg sont analysés uniquement dans les échantillons du sous-essai avec complétement minéral.

Comme cela est souvent le cas dans les échantillons de végétaux, les teneurs en **Fe** présentent une forte hétérogénéité des valeurs entre les échantillons élémentaires et ne permettent pas de mettre en évidence un effet significatif des traitements PRO.

Dans le sous-essai non complétement en engrais, les concentrations en éléments Fe, Mn, Zn et Cu dans les résidus de récolte ne présentent pas de différences significatives.

Dans le sous-essai complétement en engrais, les concentrations en **Mn** sont significativement supérieures au Témoin dans les traitements BOUE et DVB et se classent dans l'ordre BOUE ≥ DVB ≥ BIO = FUMC = FUM ≥ TEM.

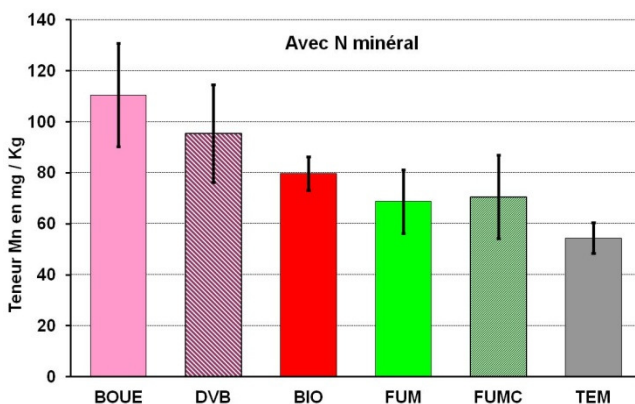


Figure 142 : Teneurs en Mn des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

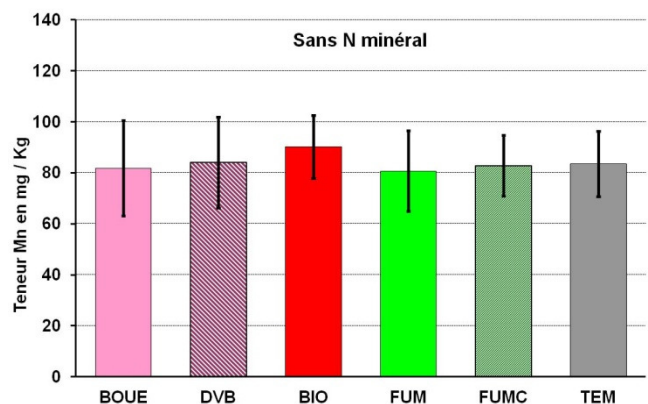


Figure 143 : Teneurs en Mn des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, les concentrations en **Zn** sont significativement supérieures au Témoin dans les traitements DVB, BIO et BOUE.

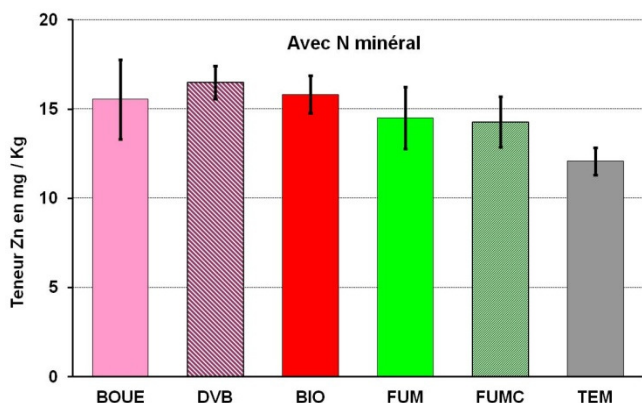


Figure 144 : Teneurs en Zn des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

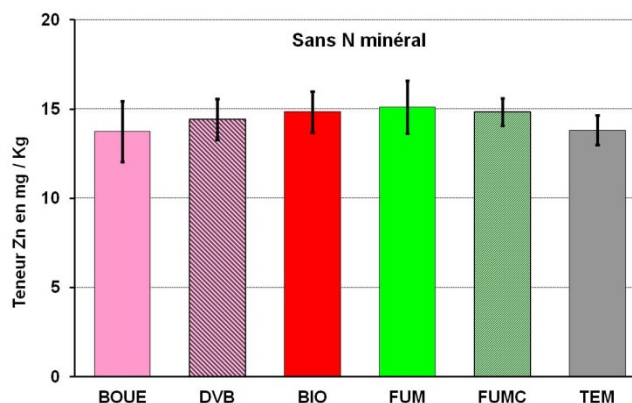


Figure 145 : Teneurs en Zn des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai sans engrais

La complémentation minérale génère une augmentation significative des concentrations en **Cu** dans les résidus de récolte de betterave. Aucun effet significatif des traitements n'est cependant mis en évidence au sein de chacun des deux sous-essais.

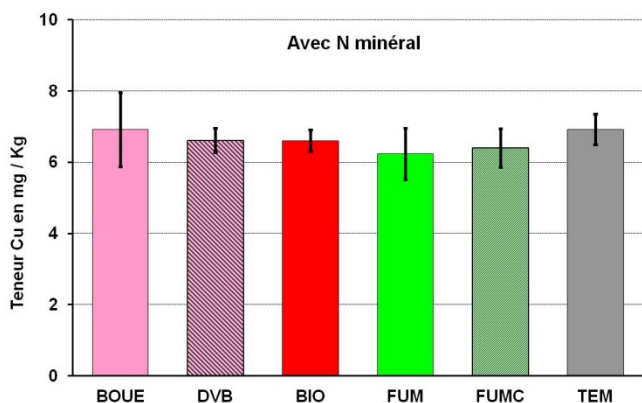


Figure 146 : Teneurs en Cu des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

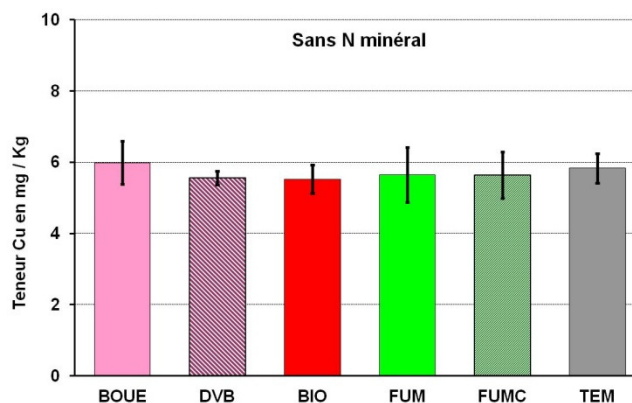


Figure 147 : Teneurs en Cu des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai sans engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, les teneurs en **B** sont significativement supérieures au Témoin dans les traitements BOUE et DVB.

Les teneurs en **Mo** sont significativement supérieures au Témoin dans tous les traitements PRO sauf DVB et se classent dans l'ordre BIO ≥ FUMC = FUM = BOUE ≥ DVB ≥ TEM.

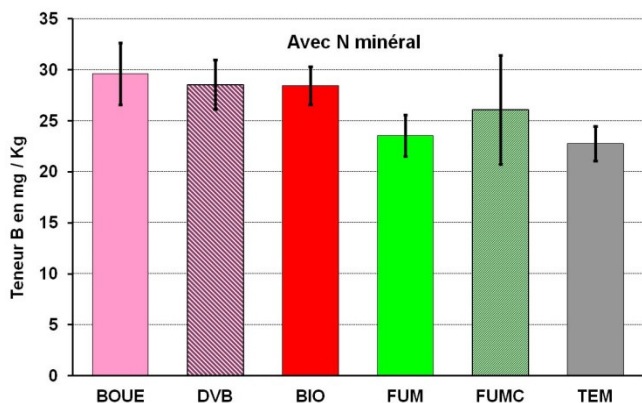


Figure 148 : Teneurs en B des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

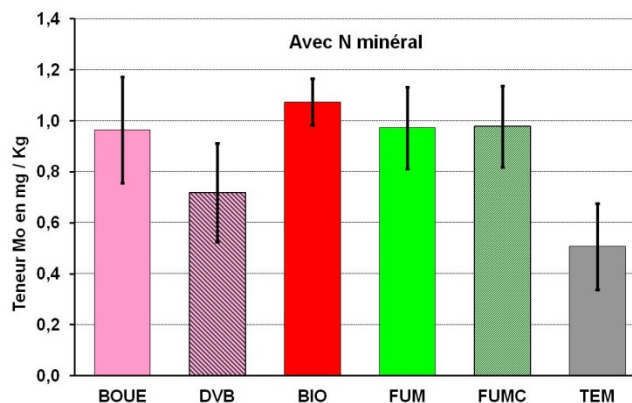


Figure 149 : Teneurs en Mo des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

Dans le sous-essai complétement en engrais, les teneurs en **Cd** dans le traitement BOUE sont significativement supérieures à celles des traitements BIO, FUMC et FUM. Les teneurs en **Hg** dans le traitement BOUE sont significativement supérieures au Témoin.

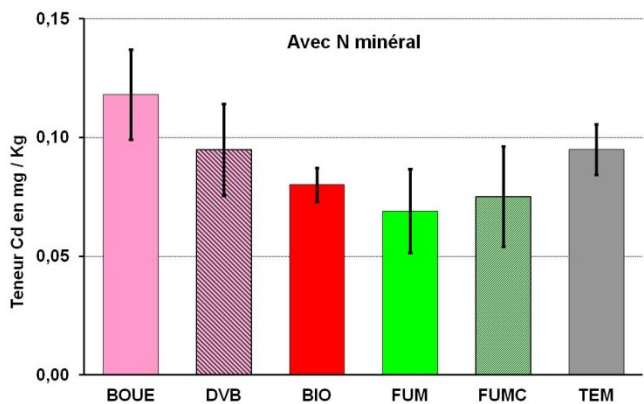


Figure 150 : Teneurs en Cd des résidus de récolte en mg/kg MS, sous-essai avec engrais

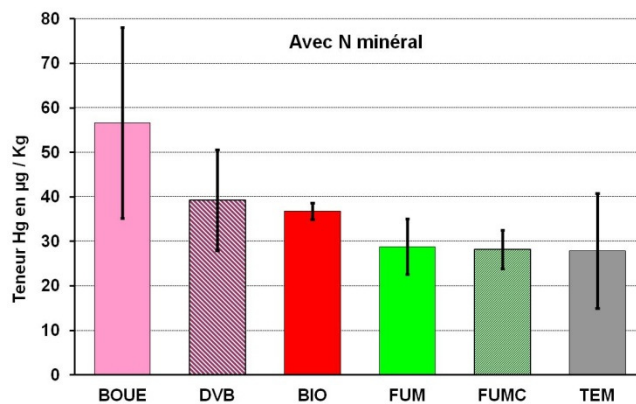


Figure 151 : Teneurs en Hg des résidus de récolte en µg/kg MS, sous-essai avec engrais

Tableau 26 : Teneurs moyennes et écarts-types des **résidus de récolte** de betterave en éléments majeurs totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

Engrais	N		P		K		Ca		Mg		Na													
	N1>N0		N0>N1		N0>N1						N1>N0													
	g / kg de matière sèche																							
	sans	avec	sans	avec	sans	avec	sans	avec	sans	avec	sans	avec												
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET												
<b>BOUE</b>	16,1	0,5	16,1	2,1	2,33	0,1	2,16	0,24	57,7	7,1	60,8	7,4	19,1	3,4	23	2,6	4,81	0,83	5,44	1,15	8,8	0,7	10	3,1
			<b>b &lt;T</b>				<b>a &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>					<b>a &gt;T</b>		<b>a</b>		
<b>DVB</b>	13,7	1,9	14,3	0,6	2,3	0,24	1,76	0,12	56,2	10,4	53,5	7,3	20,3	3,6	20,4	4,1	4,49	0,86	4,99	0,99	6,2	1,3	10,3	1,3
			<b>b &lt;T</b>				<b>b</b>				<b>ab &gt;T</b>				<b>ab</b>					<b>b &gt;T</b>		<b>a</b>		
<b>BIO</b>	13,7	2	15,4	1	2,2	0,18	1,7	0,11	54,4	6,6	52,9	2,2	19,5	2,6	18,8	1,4	4,12	0,57	4,58	0,35	7,6	1,2	13,5	0,7
			<b>b &lt;T</b>				<b>b</b>				<b>ab &gt;T</b>				<b>abc</b>					<b>ab &gt;T</b>		<b>a</b>		
<b>FUM</b>	13,8	2,1	14,9	1,5	2,2	0,32	1,84	0,13	63,5	5,9	51,8	5,1	18,8	3,2	14,4	2,1	4,34	0,91	3,87	0,66	7,7	1,8	11,1	2,3
			<b>b &lt;T</b>				<b>b</b>				<b>ab &gt;T</b>				<b>c</b>					<b>ab &gt;T</b>		<b>a</b>		
<b>FUMC</b>	12,7	0,6	15,9	1,1	2,27	0,09	1,83	0,09	55,7	9,2	50,2	5,2	19,1	1,5	16	3,5	4,22	0,6	4,21	0,89	<u>5,8</u>	<u>0,2</u>	14,2	3,2
			<b>b &lt;T</b>				<b>b</b>				<b>b &gt;T</b>				<b>bc</b>					<b>b</b>		<b>a &gt;T</b>		
<b>TEM (T)</b>	14	0,9	20,1	1	2,26	0,19	1,81	0,07	51,2	8,1	<u>36,7</u>	<u>3,5</u>	19	3,5	<u>15,7</u>	<u>1,4</u>	3,78	0,93	<u>5,37</u>	<u>0,58</u>	3,9	0,3	9,9	1,4
			<b>a</b>				<b>b</b>				<b>c</b>				<b>bc</b>					<b>c</b>		<b>a</b>		
<b>Probabilité</b>	0,12977		<b>0,00017</b>		0,9241		<b>0,00182</b>		0,47745		<b>0,00016</b>		0,98375		<b>0,00314</b>		0,58694		0,05458		<b>0,00013</b>		<b>0,02208</b>	
<b>CV</b>	11,21%		7,75%		9,27%		6,78%		14,9%		9,08%		16,71%		14,59%		18,5%		15,8%		15,07%		16,92%	
<b>Puissance</b>	57%		98%		10%		94%		25%		99%		7%		92%		21%		70%		99%		79%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

Tableau 27 : Teneurs moyennes et écarts-types des **résidus de récolte** de betterave en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

Engrais	Fe		Mn		Zn		Cu									
	mg / kg de matière sèche															
	sans		avec		sans		avec									
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET				
<b>BOUE</b>	385	138	766	369	82	19	111	20	13,8	1,7	15,6	2,2	6	0,6	6,9	1
<b>DVB</b>	563	50	695	200	84	18	95	19	14,4	1,1	16,5	0,9	5,6	0,2	6,6	0,3
<b>BIO</b>	575	168	503	101	90	12	80	7	14,9	1,1	15,8	1	5,5	0,4	6,6	0,3
<b>FUM</b>	538	176	544	135	81	16	69	12	15,1	1,5	14,5	1,7	5,6	0,8	6,2	0,7
<b>FUMC</b>	504	158	525	197	83	12	71	16	14,9	0,8	<u>14,3</u>	<u>1,4</u>	5,6	0,6	6,4	0,5
<b>TEM (T)</b>	602	125	393	219	84	13	<u>54</u>	<u>6</u>	13,8	0,8	<u>12,1</u>	<u>0,8</u>	5,8	0,4	6,9	0,4
<b>Probabilité</b>	0,28188		0,24329		0,96264		<b>0,00054</b>		0,5267		<b>0,00554</b>		0,79627		0,60082	
<b>CV</b>	24,89%		38,72%		18,44%		16,7%		8,54%		8,87%		9%		9,55%	
<b>Puissance</b>	35%		38%		8%		97%		23%		90%		14%		20%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

Tableau 28 : Teneurs moyennes et écarts-types des **résidus de récolte** de betterave en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur le sous-essai fertilisé en engrais minéral

	Al		B		Mo		Cd		Cr		Ni		Pb		Co		Se		As		Hg			
	mg / kg de matière sèche																						µg/kg MS	
Engrais	avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec			
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET		
<b>BOUE</b>	1427	695	29,6	3	0,97	0,21	0,12	0,02	<u>2,81</u>	<u>0,97</u>	<u>1,94</u>	<u>0,53</u>	<u>1,12</u>	<u>0,33</u>	0,47	0,19	0,3	0,1	0,46	0,22	57	21		
			<b>a &gt;T</b>		<b>ab &gt;T</b>		<b>a</b>														<b>a &gt;T</b>			
<b>DVB</b>	1305	391	28,6	2,4	0,72	0,19	0,09	0,02	3,7	0,85	2,51	0,83	0,99	0,3	0,44	0,17	0,29	0,07	0,44	0,14	39	11		
			<b>ab &gt;T</b>		<b>bc</b>		<b>ab</b>														<b>a</b>			
<b>BIO</b>	924	189	28,5	1,9	1,07	0,09	0,08	0,01	3,45	0,74	2,1	0,35	0,84	0,23	0,29	0,04	0,25	0,05	0,31	0,06	37	2		
			<b>ab</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>b</b>														<b>a</b>			
<b>FUM</b>	1009	264	23,6	2	0,97	0,16	0,07	0,02	3,57	0,43	2,14	0,27	0,76	0,16	0,34	0,09	0,26	0,05	0,37	0,09	29	6		
			<b>ab</b>		<b>ab &gt;T</b>		<b>b</b>														<b>a</b>			
<b>FUMC</b>	932	385	26,1	5,3	0,98	0,16	0,08	0,02	3,49	1,05	2,03	0,6	0,69	0,26	0,28	0,1	0,26	0,04	0,31	0,12	<u>28</u>	<u>4</u>		
			<b>ab</b>		<b>ab &gt;T</b>		<b>b</b>														<b>a</b>			
<b>TEM (T)</b>	720	435	<u>22,8</u>	<u>1,7</u>	0,51	0,17	<u>0,09</u>	<u>0,01</u>	2,61	1,54	1,59	0,79	0,56	0,25	0,26	0,08	0,26	0,07	0,25	0,13	28	13		
			<b>b</b>		<b>c</b>		<b>ab</b>														<b>a</b>			
<b>Probabilité</b>	0,24122		<b>0,0182</b>		<b>0,00102</b>		<b>0,01923</b>		0,53633		0,36362		0,09169		0,13801		0,89709		0,28341		<b>0,04678</b>			
<b>CV</b>	40,64%		10,72%		17,77%		20,17%		29,62%		26,54%		32,06%		36,13%		24,39%		39,45%		35,1%			
<b>Puissance</b>	38%		81%		95%		81%		23%		31%		63%		56%		11%		35%		71%			

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

### 2.4.3 Exportation d'éléments par les betteraves

Les exportations représentent les quantités d'éléments qui sortent de la parcelle par le biais des récoltes. Elles résultent du calcul du produit de la concentration par le rendement. Les exportations par les betteraves sont présentées dans les tableaux 29 à 31.

Lorsque les teneurs sont inférieures aux limites de quantification, les exportations sont estimées avec ces valeurs.

#### 2.4.3.1 Éléments majeurs

Dans le sous-essai complémenté en engrais, les exportations en **N** par le Témoin sont significativement supérieures à celles de tous les traitements PRO, grâce à des teneurs significativement supérieures.

Les exportations en **P** sont significativement supérieures au Témoin dans tous les traitements PRO sauf BIO et se classent dans l'ordre  $DVB = FUM \geq BOUE \geq FUMC > BIO = TEM$ .

Les exportations en **K** sont significativement supérieures au Témoin dans les traitements FUM, DVB et FUMC avec le classement suivant :  $FUM \geq DVB \geq FUMC \geq BIO \geq TEM = BOUE$ .

Les traitements BOUE et BIO exportent significativement moins de **Mg** que le Témoin.

Le traitement BOUE exporte significativement moins de **Na** que les traitements FUM et FUMC.

Dans le sous-essai non complémenté en engrais, les traitements BOUE, DVB et FUM exportent significativement plus de **N** que le Témoin et se classent dans l'ordre  $BOUE > DVB = FUM \geq BIO = FUMC \geq TEM$ .

Tous les traitements PRO exportent significativement plus de **P** que le témoin avec le classement suivant :  $BOUE = DVB \geq FUM = FUMC \geq BIO > TEM$ .

Les exportations de **K** sont également significativement supérieures au Témoin pour tous les traitements PRO.

Les traitements BOUE et FUM exportent significativement plus de **Mg** que le Témoin.

Les exportations de **Na** dans le traitement BOUE sont significativement supérieures à celles de tous les autres traitements.

#### 2.4.3.2 Éléments traces

Dans le sous-essai complémenté en engrais, les résultats présentés pour Cr, Ni, Fe, Co et Mo sont des estimations qui ne permettent pas d'effectuer une analyse statistique pour comparer les traitements.

Les exportations de **Mn** sont significativement supérieures au Témoin dans les traitements BOUE, DVB, FUM et FUMC.

Dans le sous-essai non complémenté en engrais, le traitement BOUE exporte significativement plus de **Fe** que les autres traitements.

Les traitements BOUE, DVB et FUM exportent significativement plus de **Cu** que le Témoin.

### 2.4.4 Stockage des éléments par les résidus de récolte

Le stockage des éléments par les résidus de récolte représente les quantités d'éléments qui transitent par les résidus de récolte avant de retourner au sol. Ils résultent du produit de la concentration par la biomasse de bouquets foliaires. Les stockages dans les résidus de récolte sont présentés dans les tableaux 32 à 34.

#### 2.4.4.1 Éléments majeurs

Les biomasses de résidus de récolte plus élevées dans le sous-essai fertilisé génèrent une augmentation significative du stockage de tous les éléments majeurs par les résidus de récolte de betterave par rapport au sous-essai non fertilisé.

Au sein des deux sous-essais, les différences significatives de biomasses observées entre les traitements influent sur les stocks d'éléments.

Dans le sous-essai complémenté en engrais, le stockage de **N** dans le Témoin est significativement supérieur aux traitements PRO avec le classement  $TEM > FUMC \geq FUM = BIO \geq BOUE = DVB$ .



Le stockage de **P** dans le Témoin est significativement supérieur aux traitements DVB, BIO et BOUE.

Le stockage de **Mg** dans le Témoin est significativement supérieur à tous les traitements PRO.

Le stockage de **Na** dans les traitements FUMC, BIO et Témoin est significativement supérieur aux traitements BOUE et DVB.

Dans le sous-essai non complémenté en engrais, le stockage de **N** dans les traitements BOUE et FUM est significativement supérieur au Témoin et se classe dans l'ordre BOUE ≥ FUM ≥ DVB = BIO = FUMC ≥ TEM.

Le stockage de **P** est significativement supérieur au Témoin dans les traitements BOUE, FUM et DVB.

Le stockage de **K** est significativement supérieur au Témoin dans tous les traitements PRO et se classe dans l'ordre FUM ≥ BOUE = DVB = FUMC ≥ BIO > TEM.

Le stockage de **Mg** est significativement supérieur au Témoin dans les traitements BOUE, FUM et DVB.

Le stockage de **Na** est également significativement supérieur au Témoin dans tous les traitements PRO et se classe dans l'ordre BOUE ≥ FUM ≥ BIO = DVB ≥ FUMC > TEM.

#### 2.4.4.2 Éléments traces

Dans le sous-essai complémenté en engrais, les stockages de **Cu** et de **Cd** sont corrélés avec les différences de biomasse entre traitements, les quantités dans le Témoin étant significativement supérieures aux traitements PRO.

Le stockage de **Mo** dans les traitements BIO, FUMC et FUM est significativement supérieur aux traitements Témoin et DVB.

Dans le sous-essai non complémenté en engrais, le stockage de **Zn** est supérieur au Témoin dans tous les traitements PRO.

Le stockage de **Cu** dans les traitements BOUE et FUM est significativement supérieur au Témoin.

Tableau 29 : exportations moyennes et écarts-types des **betteraves** en éléments majeurs totaux en 2011, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

	<b>N</b>		<b>P</b>		<b>K</b>		<b>Ca</b>		<b>Mg</b>		<b>Na</b>													
	N1>N0				N1>N0				N1>N0		N1>N0													
	kg / ha																							
<b>Engrais</b>	sans		avec		sans		avec		sans		avec		sans		avec									
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET								
<b>BOUE</b>	79	8	85	3	18,9	1,4	19,9	0,7	96	5,2	100	4,5	26,5	3,8	26,8	1,9	17,1	1,4	17,7	0,6	2,44	0,47	3,2	0,55
	<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>ab &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>c</b>						<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>b</b>	
<b>DVB</b>	67	2	101	3	18,6	1,2	21,2	0,3	95	5,7	122	6	28	1,3	29,1	3,7	16,4	1	19,8	0,6	1,5	0,07	4,73	0,76
	<b>b &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>ab &gt;T</b>						<b>ab</b>		<b>a</b>		<b>b</b>		<b>ab</b>	
<b>BIO</b>	58	2	96	7	16,1	0,9	16,2	1,3	93	4	110	9,6	26,1	2,4	26,3	1,1	16	1	18,8	1	1,44	0,12	4,74	1,41
	<b>bc</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>c</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>bc</b>						<b>ab</b>		<b>ab &lt;T</b>		<b>b</b>		<b>ab</b>	
<b>FUM</b>	65	8	101	15	17,6	1,7	21,1	1,5	101	11,6	131	14,1	25,6	3,5	26,5	1,8	16,9	1,2	20,9	1,7	1,49	0,21	5,31	1,75
	<b>b &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>ab &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>						<b>a &gt;T</b>		<b>a</b>		<b>b</b>		<b>a</b>	
<b>FUMC</b>	54	10	95	6	16,9	1,6	19	0,7	93	7,5	117	5,5	26,1	1,5	24,4	1,3	16,5	0,9	19,7	1,3	1,36	0,19	5,27	1,07
	<b>bc</b>		<b>b &lt;T</b>		<b>ab &gt;T</b>		<b>b &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>		<b>b</b>						<b>ab</b>		<b>a</b>		<b>b</b>		<b>a</b>	
<b>TEM (T)</b>	48	8	120	5	13,8	0,8	15,1	1,2	75	7,1	104	5,4	25,8	2,4	25	2,2	14,6	1,3	20,8	1	1,08	0,19	4,71	0,83
	<b>c</b>		<b>a</b>		<b>c</b>		<b>c</b>		<b>b</b>		<b>c</b>						<b>b</b>		<b>a</b>		<b>b</b>		<b>ab</b>	
<b>Probabilité</b>	<b>0,00073</b>		<b>0,00042</b>		<b>0,00044</b>		<b>0</b>		<b>0,00091</b>		<b>0,00027</b>		0,80037		0,16065		<b>0,03258</b>		<b>0,00422</b>		<b>0,00007</b>		<b>0,04621</b>	
<b>CV</b>	11,87%		7,48%		7,17%		5,1%		6,75%		6,3%		9,83%		9,16%		6,16%		5,09%		16,1%		18,93%	
<b>Puissance</b>	97%		98%		98%		99%		96%		98%		14%		45%		76%		91%		99%		72%	

Tableau 30 : Exportations moyennes et écarts-types des **betteraves** en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

Engrais	Fe		Mn		Zn		Cu									
					N1>N0											
	g / ha															
	sans		avec <sup>(2)</sup>		sans		avec <sup>(2)</sup>		sans		avec					
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET				
BOUE	1126	239	970	364	484	74	499	21	140	12	147	14	58	9	53	5
	<b>a &gt; T</b>						<b>a &gt; T</b>				<b>a &gt; T</b>					
DVB	<u>739</u>	<u>122</u>	<u>651</u>	<u>42</u>	448	41	509	48	142	14	170	9	57	11	63	3
	<b>b</b>						<b>a &gt; T</b>				<b>a &gt; T</b>					
BIO	568	243	735	121	428	22	447	35	127	4	174	11	51	6	57	11
	<b>b</b>						<b>ab</b>				<b>ab</b>					
FUM	562	45	971	179	409	45	500	41	136	13	169	17	55	8	60	6
	<b>b</b>						<b>a &gt; T</b>				<b>a &gt; T</b>					
FUMC	812	235	976	286	410	26	474	20	<u>132</u>	<u>15</u>	<u>185</u>	<u>35</u>	48	6	55	5
	<b>b</b>						<b>a &gt; T</b>				<b>ab</b>					
TEM (T)	634	157	969	184	444	33	402	17	113	7	<u>147</u>	<u>25</u>	44	4	50	8
	<b>b</b>						<b>b</b>				<b>b</b>					
<b>Probabilité</b>	<b>0,00416</b>				0,13884		<b>0,0056</b>		0,07019		0,10082		<b>0,00994</b>		0,1576	
<b>CV</b>	23,8%				9,08%		7,48%		9,79%		12,3%		9,71%		12,28%	
<b>Puissance</b>	91%				57%		89%		66%		61%		86%		45%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

(2) Lors de la première série d'analyse, sur des échantillons séchés et broyés, les échantillons des traitements avec complémentation minérale ont été contaminés en Fer lors du broyage. Une seconde analyse a été effectuée sur des échantillons frais, cependant la mesure de la teneur en matière sèche n'a pu être réalisée correctement. Les résultats présentés sont issus de la deuxième série d'analyse, sur échantillons frais, avec une correction de la teneur en MS.

Aucune analyse statistique n'est effectuée sur ces résultats.

Tableau 31 : Exportations moyennes et écarts-types des **betteraves** en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur le sous-essai fertilisé en engrais minéral

	Al		B		Mo <sup>(2)</sup>		Cd		Cr <sup>(2)</sup>		Ni <sup>(2)</sup>		Pb		Co <sup>(2)</sup>		Se		As		Hg								
																		exportations calculées avec les valeurs mesurées < LQ											
																		g / ha										mg / ha	
Engrais	avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec								
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET							
<b>BOUE</b>	1604	521	157	23	0,39	0,16	0,49	0,06	3,9	1,5	3,5	0,7	6,5	1,8	0,29	0,23	0,48	0,07	0,41	0,14	8,2	8,9							
<b>DVB</b>	1579	866	186	52	0,42	0,12	0,56	0,12	<u>2,0</u>	<u>0,2</u>	<u>2,4</u>	<u>0,4</u>	7	2,7	<u>0,27</u>	<u>0,32</u>	0,4	0,08	0,48	0,21	10,5	14,3							
<b>BIO</b>	1222	328	172	37	0,56	0,13	0,44	0,04	<u>3,2</u>	<u>0,2</u>	<u>2,6</u>	<u>0,2</u>	6,4	1,4	0,24	0,25	0,37	0,08	0,39	0,07	3,5	2,3							
<b>FUM</b>	1886	458	176	38	0,53	0,03	0,45	0,11	4,4	2,1	3,3	1,0	5,6	0,7	0,39	0,10	0,43	0,10	0,54	0,18	9,6	8,2							
<b>FUMC</b>	1526	321	162	6	0,55	0,06	0,41	0,07	4,4	1,6	3,3	0,6	7,4	1,5	0,42	0,35	0,48	0,11	0,47	0,05	4,1	3,9							
<b>TEM (T)</b>	2069	350	139	11	0,33	0,09	0,54	0,05	3,4	0,2	3,5	0,5	6,4	0,6	0,41	0,25	0,48	0,1	0,57	0,1	4	3,4							
<b>Probabilité</b>	0,30524		0,52826				0,18304						0,76656																
<b>CV</b>	31,04%		21,56%				18,13%						26,13%																
<b>Puissance</b>	34%		23%				43%						15%																

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

(2) Lors de la première série d'analyse, sur des échantillons séchés et broyés, les échantillons des traitements avec complémentation minérale ont été contaminés en Mo, Cr, Ni et Co lors du broyage. Une seconde analyse a été effectuée sur des échantillons frais, cependant la mesure de la teneur en matière sèche n'a pu être réalisée correctement. Les résultats présentés sont issus de la deuxième série d'analyse, sur échantillons frais, avec une correction de la teneur en MS.

Aucune analyse statistique n'est effectuée sur ces résultats.

Tableau 32 : stocks moyens et écarts-types des **résidus de récolte** de betterave en éléments majeurs totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

Engrais	N		P		K		Ca		Mg		Na													
	N1>N0		N1>N0		N1>N0		N1>N0		N1>N0		N1>N0													
	kg / ha																							
	sans		avec		sans		avec		sans		avec													
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET												
<b>BOUE</b>	62	9	66	16	8,9	1,3	8,9	1,9	220	41	250	67	73	20	95	24	18,5	5,2	22,6	8,2	34	4,7	42	18,4
	a >T		c <T		a >T		b <T		ab >T								a >T		b <T		a >T		b <T	
<b>DVB</b>	46	8	62	8	7,8	1,7	7,6	1,3	189	36	229	18	68	14	87	11	15,1	3,1	21,2	2,1	21	4,4	44	4,6
	bc		c <T		ab >T		b <T		ab >T								a >T		b <T		bc >T		b	
<b>BIO</b>	42	4	80	7	6,7	0,8	8,8	0,6	167	22	275	14	60	11	98	13	12,6	1,5	23,9	3,2	23	5	70	2,1
	bc		bc <T		ab		b <T		b								ab		b <T		bc >T		a	
<b>FUM</b>	52	8	82	7	8,2	1,2	10,2	1,2	237	20	285	16	70	11	79	6	16,1	3	21,2	2,3	29	6,3	61	8,9
	ab >T		bc <T		a >T		ab		a >T								a >T		b <T		ab >T		ab	
<b>FUMC</b>	41	0	90	10	7,3	0,2	10,4	1,1	179	27	284	29	61	4	90	14	13,5	1,8	23,7	3,6	<u>19</u>	<u>0,7</u>	79	12,4
	bc		b <T		ab		ab		ab >T								ab		b <T		c >T		a	
<b>TEM (T)</b>	33	6	135	11	5,3	0,6	12,1	1,1	119	4	<u>245</u>	<u>17</u>	44	3	<u>105</u>	<u>7</u>	8,7	1	<u>36</u>	<u>4,9</u>	9	1,3	66	10,7
	c		a		b		a		c								b		a		d		a	
<b>Probabilité</b>	0,00169		0,00001		0,01545		0,0036		0,00099		0,17192		0,06563		0,24943		0,00961		0,00475		0,00006		0,00248	
<b>CV</b>	16,02%		13,17%		16,63%		13,18%		15,84%		13,15%		20,39%		16,09%		21,86%		19,1%		20,08%		19,12%	
<b>Puissance</b>	95%		99%		82%		92%		96%		44%		67%		37%		86%		90%		99%		93%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

Tableau 33 : Stocks moyens et écarts-types des **résidus de récolte** de betterave en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur les sous-essais fertilisé et non-fertilisé en engrais minéral

Engrais	Fe		Mn		Zn		Cu									
	N1>N0		N1>N0		N1>N0		N1>N0									
	g / ha															
	sans		avec		sans		avec		sans		avec					
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET				
<b>BOUE</b>	1469	589	3163	1663	314	97	458	149	52	9,8	64	17,0	22,8	3	28,4	7,2
									<b>a &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>	
<b>DVB</b>	1903	351	2996	932	283	67	407	61	49	9,3	71	9,3	18,9	4	28,7	4,7
									<b>a &gt;T</b>				<b>ab</b>		<b>b &lt;T</b>	
<b>BIO</b>	1808	758	2614	477	279	59	417	55	46	6,8	82	7,2	17,1	2,9	34,4	2,2
									<b>a</b>				<b>ab</b>		<b>b &lt;T</b>	
<b>FUM</b>	1988	599	2997	730	299	43	378	61	56	5,2	80	9,1	21	2,2	34,4	3,6
									<b>a &gt;T</b>				<b>a &gt;T</b>		<b>b &lt;T</b>	
<b>FUMC</b>	1617	475	2931	914	266	32	397	68	48	2,2	<u>81</u>	<u>3,5</u>	18,1	1,7	36,2	3,4
									<b>a &gt;T</b>				<b>ab</b>		<b>b &lt;T</b>	
<b>TEM (T)</b>	1409	269	2641	1490	195	27	<u>364</u>	<u>41</u>	33	5,3	<u>81</u>	<u>6,4</u>	13,8	2,2	46,3	2,1
									<b>b</b>				<b>b</b>		<b>a</b>	
<b>Probabilité</b>	0,60403		0,97712		0,1749		0,68837		<b>0,00879</b>		0,09402		<b>0,01291</b>		<b>0,00125</b>	
<b>CV</b>	32,29%		39,9%		22,57%		20,54%		15,54%		12,45%		16,04%		13,56%	
<b>Puissance</b>	20%		7%		43%		17%		87%		62%		84%		95%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

Tableau 34 : Stocks moyens et écarts-types des **résidus de récolte** de betterave en éléments traces totaux en 2011 <sup>(1)</sup>, sur le sous-essai fertilisé en engrais minéral

	Al		B		Mo		Cd		Cr		Ni		Pb		Co		Se		As		Hg	
	g / ha																					
Engrais	avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec		avec	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
<b>BOUE</b>	5886	3110	122	28,5	4	1,5	0,48	0,11	<u>11,8</u>	<u>5,9</u>	<u>8,1</u>	<u>3,4</u>	<u>4,6</u>	<u>1,5</u>	1,91	0,84	1,23	0,55	1,9	1	0,24	0,13
					<b>ab</b>		<b>b</b>															
<b>DVB</b>	5624	1808	122	7,9	3	0,5	0,41	0,07	16,1	5	10,9	4,5	4,28	1,5	1,91	0,77	1,22	0,26	1,91	0,63	0,17	0,05
					<b>b</b>		<b>b &lt; T</b>															
<b>BIO</b>	4798	901	149	16,3	5,6	0,7	0,42	0,05	18	4,1	11	2,2	4,37	1,11	1,5	0,22	1,31	0,23	1,62	0,3	0,19	0,02
					<b>a &gt; T</b>		<b>b &lt; T</b>															
<b>FUM</b>	5556	1429	131	19,7	5,3	0,6	0,38	0,09	19,8	3,3	11,9	2,1	4,22	0,91	1,86	0,49	1,41	0,19	1,99	0,39	0,16	0,02
					<b>a &gt; T</b>		<b>b &lt; T</b>															
<b>FUMC</b>	5171	1635	148	31,6	5,5	0,8	0,42	0,09	19,4	4,6	11,4	2,8	3,83	1,06	1,56	0,42	1,47	0,16	1,75	0,5	0,16	0,03
					<b>a &gt; T</b>		<b>b &lt; T</b>															
<b>TEM (T)</b>	4835	2949	<u>152</u>	<u>7,1</u>	3,4	1,1	<u>0,64</u>	<u>0,08</u>	17,4	10,4	10,6	5,3	3,74	1,72	1,77	0,6	1,71	0,47	1,66	0,91	0,19	0,09
					<b>b</b>		<b>a</b>															
<b>Probabilité</b>	0,97065		0,15185		<b>0,00322</b>		<b>0,01461</b>		0,39736		0,59718		0,92932		0,87553		0,45247		0,96461		0,63175	
<b>CV</b>	41,81%		14,61%		20,66%		19,86%		32,27%		28,64%		31,1%		34,94%		26,55%		39,5%		39,61%	
<b>Puissance</b>	8%		55%		92%		83%		29%		21%		9%		11%		26%		8%		19%	

(1) Les valeurs moyennes soulignées ont fait l'objet de l'estimation par la formule de Yates d'une donnée initiale suspecte ou manquante.

## 2.4.5 Synthèse des effets significatifs sur la qualité des produits récoltés

Tableau 35 : synthèse des différences significatives entre traitements en 2011 sur les **concentrations** en éléments dans le **sous-essai complétementé** en engrais minéral

Élément	Concentrations betteraves	Concentrations résidus de récolte
N	TEM > FUM = BIO = FUMC = DVB = BOUE	TEM > BOUE = FUMC = BIO = FUM = DVB
P		BOUE > FUM = FUMC = TEM = BIO = DVB
K	FUM = TEM = FUMC ≥ DVB = BIO ≥ BOUE	BOUE ≥ DVB = BIO = FUM ≥ FUMC > TEM
Ca		BOUE ≥ DVB ≥ BIO ≥ FUMC = TEM ≥ FUM
Mg	TEM > FUM = FUMC ≥ BIO = DVB ≥ BOUE	
Na	TEM = FUMC = FUM = BIO = DVB > BOUE	FUMC (>T) = BIO = FUM = DVB = BOUE = TEM
Mn		BOUE ≥ DVB ≥ BIO = FUMC = FUM ≥ TEM
Zn	FUMC ≥ TEM = BIO = FUM = DVB ≥ BOUE	DVB = BIO = BOUE ≥ FUM = FUMC ≥ TEM
B		BOUE ≥ DVB = BIO = FUMC = FUM ≥ TEM
Mo	<i>problème de contamination</i>	BIO ≥ FUMC = FUM = BOUE ≥ DVB ≥ TEM
Cd	TEM > DVB = BOUE = BIO = FUM = FUMC	BOUE ≥ TEM = DVB ≥ BIO = FUMC = FUM
Hg	< LQ	BOUE (>T) = DVB = BIO = FUM = FUMC = TEM

Tableau 36 : synthèse des différences significatives entre traitements en 2011 sur les **concentrations** en éléments dans le **sous-essai non complétementé** en engrais minéral

Élément	Concentrations betteraves	Concentrations résidus de récolte
N	BOUE > DVB = FUM = BIO = FUMC = TEM	
P	BOUE ≥ DVB ≥ FUM = FUMC ≥ BIO ≥ TEM	
K	FUM = FUMC = BOUE = BIO = DVB > TEM	
Na	BOUE > FUM = BIO = DVB = FUMC = TEM	BOUE ≥ FUM = BIO ≥ DVB = FUMC > TEM
Fe	BOUE > FUMC = DVB = TEM = BIO = FUM	
Mn	TEM ≥ BOUE ≥ DVB = BIO ≥ FUMC ≥ FUM	
Cu	BOUE (>T) = DVB = FUM = BIO = TEM = FUMC	



**Tableau 37** : synthèse des différences significatives entre traitements en 2011 sur les **mobilisations** en éléments dans le **sous-essai complétement** en engrais minéral

Élément	Exportations betteraves	Stockage résidus de récolte
N	TEM > FUM = DVB = BIO = FUMC = BOUE	TEM > FUMC ≥ FUM = BIO ≥ BOUE = DVB
P	DVB = FUM ≥ BOUE ≥ FUMC > BIO = TEM	TEM ≥ FUMC = FUM ≥ BOUE = BIO = DVB
K	FUM ≥ DVB ≥ FUMC ≥ BIO ≥ TEM = BOUE	
Mg	FUM = TEM = DVB = FUMC ≥ BIO ≥ BOUE	TEM > BIO = FUMC = BOUE = DVB = FUM
Na	FUM = FUMC ≥ BIO = DVB = TEM ≥ BOUE	FUMC = BIO = TEM ≥ FUM ≥ DVB = BOUE
Mn	DVB = FUM = BOUE = FUMC ≥ BIO ≥ TEM	
Cu		TEM > FUMC = FUM = BIO = DVB = BOUE
Mo	<i>problème de contamination</i>	BIO = FUMC = FUM ≥ BOUE ≥ TEM = DVB
Cd		TEM > BOUE = FUMC = BIO = DVB = FUM

**Tableau 38** : synthèse des différences significatives entre traitements en 2011 sur les **mobilisations** en éléments dans le **sous-essai non complétement** en engrais minéral

Élément	Exportations betteraves	Stockage résidus de récolte
N	BOUE > DVB = FUM ≥ BIO = FUMC ≥ TEM	BOUE ≥ FUM ≥ DVB = BIO = FUMC ≥ TEM
P	BOUE = DVB ≥ FUM = FUMC ≥ BIO > TEM	BOUE = FUM ≥ DVB = FUMC = BIO ≥ TEM
K	FUM = BOUE = DVB = FUMC = BIO > TEM	FUM ≥ BOUE = DVB = FUMC ≥ BIO > TEM
Mg	BOUE = FUM ≥ FUMC = DVB = BIO ≥ TEM	BOUE = FUM = DVB ≥ FUMC = BIO ≥ TEM
Na	BOUE > DVB = FUM = BIO = FUMC = TEM	BOUE ≥ FUM ≥ BIO = DVB ≥ FUMC > TEM
Fe	BOUE > FUMC = DVB = TEM = BIO = FUM	
Zn		FUM = BOUE = DVB = FUMC = BIO > TEM
Cu	BOUE = DVB = FUM ≥ BIO = FUMC ≥ TEM	BOUE = FUM ≥ DVB = FUMC = BIO ≥ TEM

## 2.5 Dynamique de l'azote dans les sols

### 2.5.1 Reliquats d'azote avant épandage

En novembre 2010, les reliquats d'azote dans l'horizon de surface sont statistiquement supérieurs dans le sous-essai complétement par rapport au sous-essai non complétement, quoique de seulement 4 kg/ha.

Dans le sous-essai avec complément d'engrais, aucune différence entre traitements PRO n'est mise en évidence. On observe cependant une différence entre traitements PRO et témoin dans l'horizon 90-120 cm sans que cela soit statistiquement significatif. Les parcelles témoin présentent en effet une moyenne particulièrement élevée due à des mesures de 131 kg/ha dans la parcelle du bloc II et de 42 kg/ha dans le bloc I, induisant un CV conséquent (tableau 39, figure 152). Une explication plausible réside en l'éventualité de la persistance d'un effet de la sur-fertilisation du témoin survenue en 2003, et d'un effet pépète en divers endroits dans l'horizon profond de ces parcelles témoin. La probabilité de mesurer une valeur élevée est alors dépendante du point de prélèvement.

Dans le sous-essai sans complémentation, le stock d'azote minéral dans l'horizon 30-60 est significativement supérieur au témoin dans les parcelles DVB de 4 kg/ha (tableau 40, figure 153).

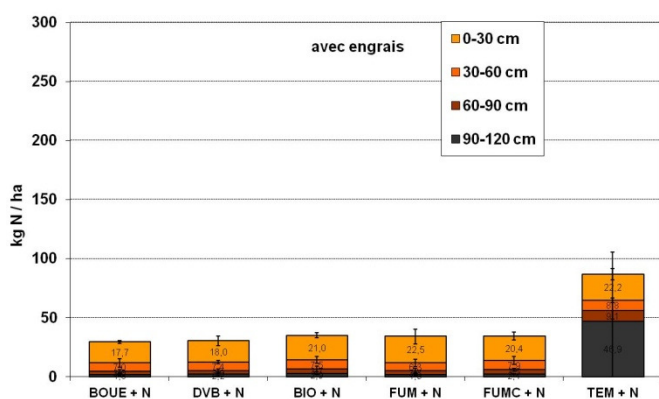


Figure 152 : Reliquats d'azote dans les sols du sous-essai fertilisé, 16 et 17/11/2010 en kg N<sub>min</sub> / ha (avant épandage)

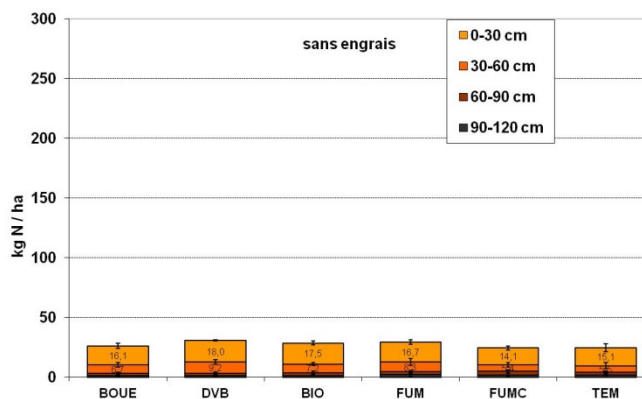


Figure 153 : Reliquats d'azote dans les sols du sous-essai non fertilisé, 16 et 17/11/2010 en kg N<sub>min</sub> / ha (avant épandage)

### 2.5.2 Reliquats d'azote avant semis

Les prélèvements sont effectués avant le semis de betterave, les 7 et 8 mars 2011, soit trois mois après l'épandage (tableaux 41 et 42, figures 154 et 155). Dans les deux sous-essais, l'analyse statistique conclut à des stocks significativement supérieurs dans le traitement BOUE par rapport aux autres traitements, dans l'horizon labouré ainsi que dans l'ensemble du profil. Les écarts-types sont élevés dans ce traitement et montrent une variabilité des teneurs mesurées entre les répétitions intra et inter-parcellaires. Cette variabilité est générée par des effets pépète dépendants des différents points de prélèvement. L'augmentation du stock d'azote minéral dans BOUE par rapport aux autres traitements est cohérente avec les flux d'azote minéral apportés par ce PRO lors de l'épandage et une cinétique de minéralisation de l'azote plus rapide.

Les mesures dans l'horizon 90-120 cm du témoin fertilisé sont homogènes, après l'hétérogénéité observée en novembre 2010.

Dans les deux sous-essais, les stocks d'azote minéral sont également significativement supérieurs au témoin pour les traitements BOUE et DVB dans l'horizon 30-60 cm. Dans le sous-essai sans complémentation, dans l'horizon 30-60 cm du traitement BOUE, ils sont également significativement supérieurs à ceux des traitements FUM, FUMC et BIO.

BOUE et DVB sont les deux PRO qui apportent le plus d'azote minéral dans l'horizon labouré au moment de l'épandage (environ 40 kg N<sub>minéral</sub>/ha en 2011). Une partie de cet azote minéral a migré vers l'horizon sous-jacent (30-60 cm) durant les trois mois d'hiver.

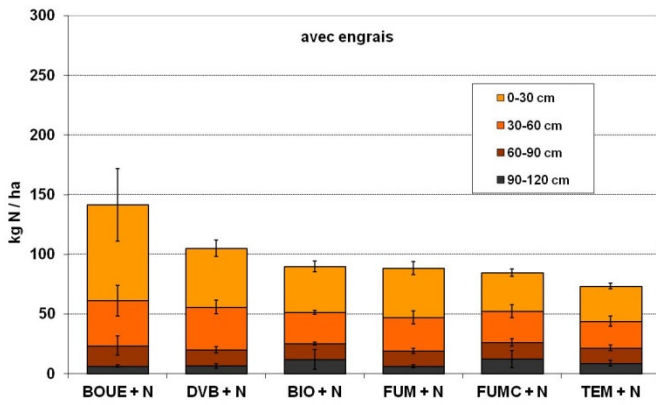


Figure 154 : Reliquats d'azote dans les sols du sous-essai fertilisé, 7 et 8/03/2011 en  $\text{kg N}_{\text{min}} / \text{ha}$  (sortie hiver suivant l'épandage de décembre 2010)

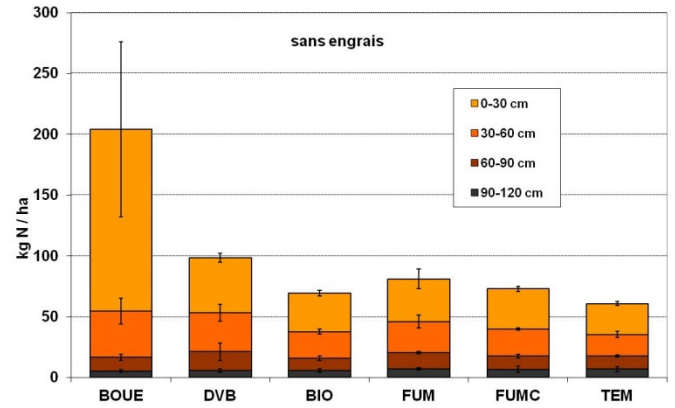


Figure 155 : Reliquats d'azote dans les sols du sous-essai non-fertilisé, 7 et 8/03/2011 en  $\text{kg N}_{\text{min}} / \text{ha}$  (sortie hiver suivant l'épandage de décembre 2010)

### 2.5.3 Reliquats d'azote après récolte

Les prélèvements sont effectués après la récolte de betterave en octobre 2011. Les stocks sont appauvris dans l'ensemble du profil pour tous les traitements des deux sous-essais, avec une moyenne de 20 à 22  $\text{kg/ha}$  d'azote minéral sur 0-120 cm, hormis pour le témoin fertilisé (tableaux 43 et 44, figures 156 à 157). En effet dans le sous-essai complétement en N minéral, le témoin présente des stocks significativement supérieurs aux traitements PRO dans les horizons 30-60, 60-90 et 90-120 cm ainsi que dans l'ensemble du profil. Ce surplus est de 14  $\text{kg/ha}$  par rapport à la moyenne des traitements PRO. Ceci corrobore l'hypothèse d'un léger excès d'apport d'azote minéral lors de la complémentation sur le témoin, accentué par un peuplement de betteraves plus faible.

Néanmoins, l'estimation des reliquats d'azote après récolte utilisée pour le calcul de la fertilisation minérale est de 30  $\text{kg/ha}$ . Les doses d'azote minéral calculées et apportées sur la culture génèrent un stock légèrement inférieur à cette estimation dans les traitements PRO, et en cohérence sur le témoin.

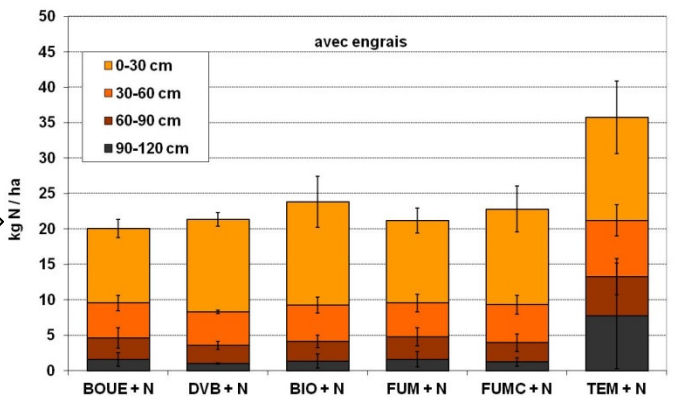
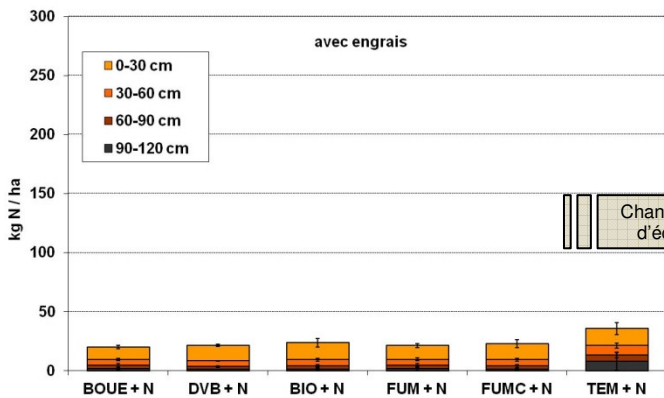


Figure 156 : Reliquats d'azote dans les sols du sous-essai fertilisé, 18 et 24/10/2011 en  $\text{kg N}_{\text{min}} / \text{ha}$  (après récolte)

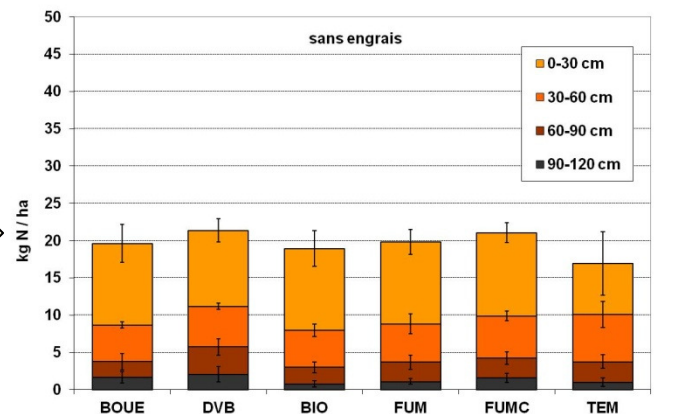
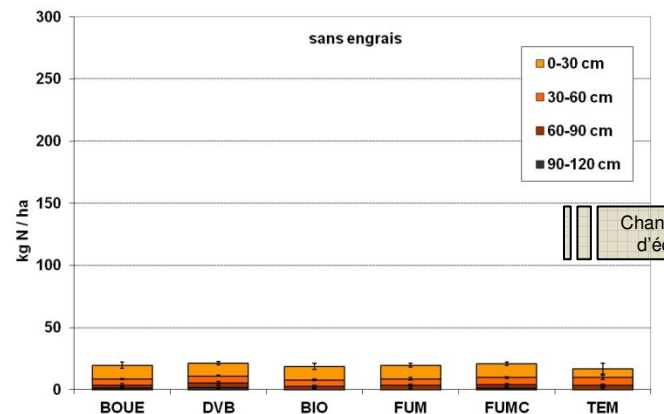


Figure 157 : Reliquats d'azote dans les sols du sous-essai non-fertilisé, 18 et 24/10/2011 en  $\text{kg N}_{\text{min}} / \text{ha}$  (après récolte)

Tableau 39 : Stock d'azote minéral dans les sols les **16 et 17/11/2010** en kg N<sub>min</sub> / ha sur quatre horizons (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm) et sur l'ensemble du profil (0-120 cm), moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) avec complémentation minérale azotée ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes.

	<b>Horizon 0-30 cm</b>		<b>Horizon 30-60 cm</b>		<b>Horizon 60-90 cm</b>		<b>Horizon 90-120 cm</b>		<b>Profil 0-120 cm</b>	
	kg N / ha									
	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>
<b>BOUE</b>	17,7	1,2	7	3,7	3	1,4	1,8	0,8	29,5	4,6
<b>DVB</b>	18	3,9	7,4	1,3	2,9	1,5	2,2	1,2	30,4	5,3
<b>BIO</b>	21	2,1	7,5	2,9	3,7	2,3	2,9	1,2	35,1	6,8
<b>FUM</b>	22,5	6,3	6,3	3	3,4	1,8	1,9	0,9	34,2	11,2
<b>FUMC</b>	20,4	3,3	7,9	3,3	3,5	1,3	2,4	0,5	34,3	8,2
<b>TEM</b>	22,2	4,8	8,8	1,8	9,1	7	46,9	58,5	87	62,4
<b>Probabilité (<math>\alpha = 5\%</math>)</b>	0,48842		0,75584		0,11289		0,0996		0,07863	
<b>CV (%)</b>	21 %		30,68 %		76,51 %		249,68 %		67,76 %	
<b>Puissance (<math>\alpha = 5\%</math>)</b>	25 %		15 %		59 %		61 %		64 %	

Tableau 40 : Stock d'azote minéral dans les sols les **16 et 17/11/2010** en kg N<sub>min</sub> / ha sur quatre horizons (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm) et sur l'ensemble du profil (0-120 cm), moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) sans complémentation minérale azotée ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes.

	<b>Horizon 0-30 cm</b>		<b>Horizon 30-60 cm</b>		<b>Horizon 60-90 cm</b>		<b>Horizon 90-120 cm</b>		<b>Profil 0-120 cm</b>	
	kg N / ha									
	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>
<b>BOUE</b>	16,1	2,2	6,7 <b>a</b>	2	2	0,8	1,4	0,6	26,3	2,1
<b>DVB</b>	18	0,5	9,2 <b>a &gt; T</b>	1,8	2,3	0,7	1,2	0,6	30,7	2,4
<b>BIO</b>	17,5	1,5	7,2 <b>a</b>	1,3	2,4	1,1	1,5	0,2	28,7	3,5
<b>FUM</b>	16,7	1,9	8,3 <b>a</b>	2,8	2,4	0,9	2,2	1,2	29,6	6,5
<b>FUMC</b>	14,1	1,6	5,4 <b>a</b>	1,8	3	1,1	2	1,3	24,5	4,8
<b>TEM</b>	15,1	3,3	5,5 <b>a</b>	2,7	2,2	0,8	1,8	0,7	24,6	7
<b>Probabilité (α =5%)</b>	0,09854		<b>0,03794</b>		0,24334		0,10792		0,08484	
<b>CV (%)</b>	12,04 %		24,04 %		21,05 %		29,72 %		12,28 %	
<b>Puissance (α =5%)</b>	61 %		73 %		38 %		60 %		63 %	

Tableau 41 : Stock d'azote minéral dans les sols les **7 et 8/03/2011** en kg N<sub>min</sub> / ha sur quatre horizons (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm) et sur l'ensemble du profil (0-120 cm), moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) avec complémentation minérale azotée ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes.

	<b>Horizon 0-30 cm</b>		<b>Horizon 30-60 cm</b>		<b>Horizon 60-90 cm</b>		<b>Horizon 90-120 cm</b>		<b>Profil 0-120 cm</b>	
	kg N / ha									
	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>
<b>BOUE</b>	80,4	30,3	37,6	12,9	17	8,2	6,5	1,1	141,6	49,3
	<b>a &gt; T</b>		<b>a &gt; T</b>						<b>a &gt; T</b>	
<b>DVB</b>	49,2	6,9	35,9	5,8	13,3	2,6	6,6	1,8	105	11,1
	<b>b</b>		<b>a &gt; T</b>						<b>b</b>	
<b>BIO</b>	38,3	4,7	26,4	1,7	13,2	1,3	12	8,2	89,9	8,4
	<b>b</b>		<b>a</b>						<b>b</b>	
<b>FUM</b>	41,2	5,5	28,1	5,4	12,9	2,2	6,3	1,2	88,5	12
	<b>b</b>		<b>a</b>						<b>b</b>	
<b>FUMC</b>	32,2	3,1	26,1	5,6	13,9	3,2	12,3	7,1	84,5	17,4
	<b>b</b>		<b>a</b>						<b>b</b>	
<b>TEM (T)</b>	29,5	2,4	22,3	4,3	12,8	2,4	8,8	2,4	73,5	8,7
	<b>b</b>		<b>a</b>						<b>b</b>	
<b>Probabilité (α =5%)</b>	<b>0,00035</b>		<b>0,038</b>		0,667		0,289		<b>0,0073</b>	
<b>CV (%)</b>	27%		23%		29%		54%		22%	
<b>Puissance (α =5%)</b>	98%		73%		18%		35%		87%	

Tableau 42 : Stock d'azote minéral dans les sols les **7 et 8/03/2011** en kg N<sub>min</sub> / ha sur quatre horizons (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm) et sur l'ensemble du profil (0-120 cm), moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) sans complémentation minérale azotée ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes.

	<b>Horizon 0-30 cm</b>		<b>Horizon 30-60 cm</b>		<b>Horizon 60-90 cm</b>		<b>Horizon 90-120 cm</b>		<b>Profil 0-120 cm</b>	
	kg N / ha									
	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>
<b>BOUE</b>	149,5	72	37,9	10,5	11,3	2,6	5,4	1,1	204,1	68,1
	<b>a &gt;T</b>		<b>a &gt;T</b>						<b>a &gt;T</b>	
<b>DVB</b>	45,1	3,5	32,1	7	15,6	7,3	5,7	1,4	98,4	9,2
	<b>b</b>		<b>ab &gt;T</b>						<b>b</b>	
<b>BIO</b>	31,8	2,4	21,8	2,2	10,2	1,6	5,7	1,4	69,5	6,4
	<b>b</b>		<b>bc</b>						<b>b</b>	
<b>FUM</b>	35	8,1	25,5	5,5	13,5	1	7,1	1,1	81	14
	<b>b</b>		<b>bc</b>						<b>b</b>	
<b>FUMC</b>	33	2,1	22,5	1	10,8	1,6	6,8	2,6	73	6,4
	<b>b</b>		<b>bc</b>						<b>b</b>	
<b>TEM (T)</b>	25,3	1,6	17,7	2,5	10,7	1	7,1	2	60,8	3,9
	<b>b</b>		<b>c</b>						<b>b</b>	
<b>Probabilité (α =5%)</b>	<b>0,00023</b>		<b>0,00059</b>		0,23		0,57		<b>0,00003</b>	
<b>CV (%)</b>	56%		19%		28%		28%		28%	
<b>Puissance (α =5%)</b>	98%		97%		39%		21%		99%	

Tableau 43 : Stock d'azote minéral dans les sols les **18 et 24/10/2011** en kg N<sub>min</sub> / ha sur quatre horizons (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm) et sur l'ensemble du profil (0-120 cm), moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) avec complémentation minérale azotée ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes.

	<b>Horizon 0-30 cm</b>		<b>Horizon 30-60 cm</b>		<b>Horizon 60-90 cm</b>		<b>Horizon 90-120 cm</b>		<b>Profil 0-120 cm</b>	
	kg N / ha									
	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>	moyenne	<i>ET</i>
<b>BOUE</b>	10,5	1,3	4,9	1,1	3	1,4	1,6	1	20,1	4,4
			<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>	
<b>DVB</b>	13	0,9	4,8	0,3	2,5	0,6	1	0,1	21,4	0,9
			<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>	
<b>BIO</b>	14,5	3,6	5,1	1,1	2,8	0,9	1,4	1	23,8	6,2
			<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b</b>	
<b>FUM</b>	11,6	1,8	4,7	1,2	3,2	1,3	1,6	1,1	21,2	4,1
			<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>	
<b>FUMC</b>	13,5	3,3	5,4	1,3	2,7	1,2	1,2	0,6	22,8	5,5
			<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b &lt; T</b>		<b>b</b>	
<b>TEM (T)</b>	14,6	5,1	7,9	2,2	5,5	2,5	7,8	7,5	35,8	16,9
			<b>a</b>		<b>a</b>		<b>a</b>		<b>a</b>	
<b>Probabilité (<math>\alpha = 5\%</math>)</b>	0,26		<b>0,0065</b>		<b>0,0158</b>		<b>0,033</b>		<b>0,039</b>	
<b>CV (%)</b>	21%		20%		34%		119%		27%	
<b>Puissance (<math>\alpha = 5\%</math>)</b>	36%		88%		81%		75%		73%	



Tableau 44 : Stock d'azote minéral dans les sols les **18 et 24/10/2011** en kg N<sub>min</sub> / ha sur quatre horizons (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm) et sur l'ensemble du profil (0-120 cm), moyenne et écart-type des 6 traitements (sur 4 blocs) sans complémentation minérale azotée ; résultats d'analyses de variance du facteur « produit organique » et comparaisons de moyennes.

	Horizon 0-30 cm		Horizon 30-60 cm		Horizon 60-90 cm		Horizon 90-120 cm		Profil 0-120 cm	
	kg N / ha									
	moyenne	ET	moyenne	ET	moyenne	ET	moyenne	ET	moyenne	ET
<b>BOUE</b>	10,9	2,5	4,9	0,4	2,1	1,1	1,7	0,8	19,6	3,4
<b>DVB</b>	10,2	1,6	5,4	0,4	3,7	1,1	2	1	21,4	3,3
<b>BIO</b>	10,9	2,4	5	0,8	2,2	0,7	0,8	0,4	18,9	3,5
<b>FUM</b>	11	1,7	5,1	1,3	2,6	1	1,1	0,4	19,8	3,7
<b>FUMC</b>	11,2	1,4	5,7	0,7	2,7	0,8	1,6	0,6	21,1	0,9
<b>TEM (T)</b>	6,8	4,3	6,3	1,8	2,7	0,9	1	0,6	16,9	4,2
<b>Probabilité (<math>\alpha = 5\%</math>)</b>	0,112		0,45		0,16		0,11		0,46	
<b>CV (%)</b>	22%		20%		31%		47%		17%	
<b>Puissance (<math>\alpha = 5\%</math>)</b>	59%		26%		44%		59%		26%	

## 2.6 Suivi de la qualité des eaux de pluie

Les précipitations recueillies par le pluviomètre réfrigéré sont échantillonnées et congelées chaque semaine. Les aliquotes sont mélangées au laboratoire pour constituer un échantillon trimestriel, en tenant compte des volumes de précipitations hebdomadaires. Cela permet de calculer des flux de polluants sur deux ans et de les comparer aux flux apportés par les PRO durant la même période.

Les précipitations humides ont apporté 15 kg/ha d'azote au cours des années 2010 et 2011.

Les flux d'ETM apportés par les eaux de pluie en 2010 et 2011 sont présentés sur la figure 158. Ils sont comparés aux flux apportés par les PRO lors de l'épandage 2011 dans le tableau 45 et la figure 159. Seuls les éléments Zn, Cu et Pb présentent systématiquement des teneurs mesurables par le laboratoire. Pour certains trimestres, les teneurs en Cd et Co sont chiffrées. Les autres éléments traces sont présents dans des teneurs inférieures aux limites de quantification. Les flux sont alors calculés avec les valeurs brutes fournies par le laboratoire d'analyse des sols d'Arras (INRA) depuis 2009. Ils permettent d'estimer un ordre de grandeur mais présentent néanmoins une forte incertitude.

Les teneurs en ETM mesurées sur les pluies sont cohérentes avec la littérature. Une tendance à la baisse des apports en Zn et Cu était observée les années précédentes. Sur la période qui couvre les années 2010 et 2011, les flux de Zn et Cu sont en hausse. Cette augmentation est très forte pour le Zn notamment en 2011, et les valeurs sont plus proches de celles mesurées lors des premières campagnes de prélèvement d'eau de pluie (2003 à 2006). Les précipitations humides ont apporté 166 g/ha de Zn sur deux ans (2010 et 2011), ce qui représente 4 % des apports en Zn par DVB fin 2010, et 17% des flux apportés par BOUE.

Les flux en Cu issus des pluies sont de 19 g/ha en deux ans, et représentent 1,2% des apports par DVB et 7% des apports par les fumiers.

L'augmentation des apports en Pb par les eaux de pluie continue. Ils atteignent 12 g/ha en 2010/2011, ce qui constitue des flux supérieurs aux apports par FUM durant la même période, 17% des apports par BOUE et 3% des apports par le traitement DVB.

Les flux de Hg apportés par les pluies, calculés à partir des valeurs brutes (< limites de quantification) sont nettement supérieurs aux flux apportés par les PRO, ce qui n'était pas le cas en 2009.

Les flux de Cd représentent une part non négligeable des apports par certains PRO, notamment 30 à 40% des flux apportés par BOUE ou par les fumiers.

Les flux de B par les eaux de pluie sont également élevés (65 g/ha en deux ans), en comparaison avec les flux *via* les PRO.

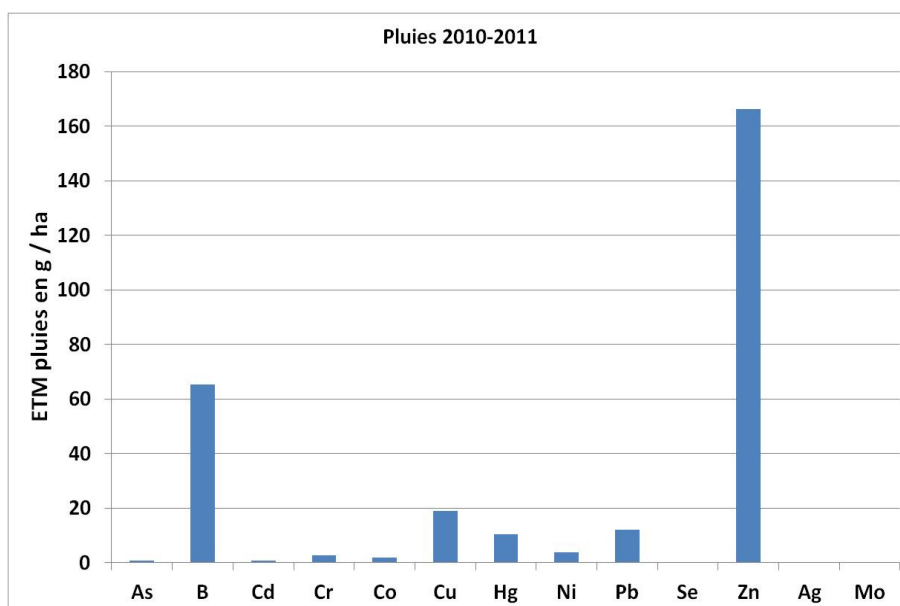
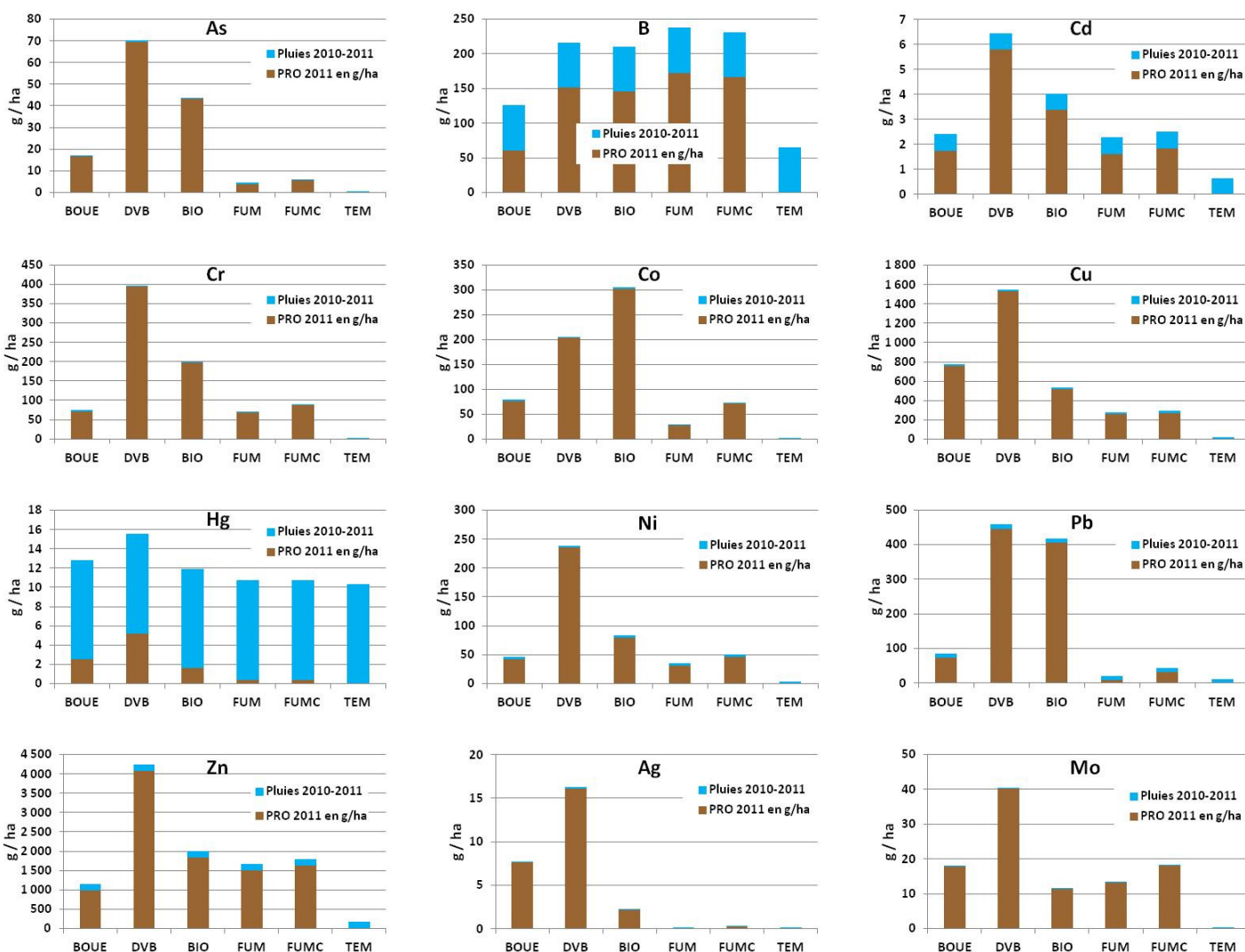


Figure 158 : flux en ETM apportés par les eaux de pluie en 2010 et 2011 en g/ha

**Tableau 45** : Flux en ETM apportés par les eaux de pluie en 2010 et 2011 et comparaison aux apports par les PRO lors de l'épandage 2011 en g/ha

	Pluies 2010-2011	PRO 2011 en g/ha					
	en g/ha	BOUE	DVB	BIO	FUM	FUMC	TEM
<b>As</b>	0,61	17	70	43	3,9	5,6	0
<b>B</b>	65	61	151	145	172	166	0
<b>Cd</b>	0,65	1,7	5,8	3,4	1,6	1,8	0
<b>Cr</b>	2,6	71	395	197	69	87	0
<b>Co</b>	1,7	77	204	303	28	71	0
<b>Cu</b>	18,8	756	1 528	520	258	271	0
<b>Hg</b>	10,3	2,5	5,2	1,6	0,4	0,4	0
<b>Ni</b>	3,8	42	235	80	32	46	0
<b>Pb</b>	12,1	72	445	406	8	32	0
<b>Se</b>	0	10	16	22	9	8	0
<b>Zn</b>	166	979	4 084	1 843	1 498	1 626	0
<b>Ag</b>	0,13	8	16	2,2	0,07	0,22	0
<b>Mo</b>	0,25	18	40	11	13	18	0

cases grisées = teneurs <LQ



**Figure 159** : Flux en ETM apportés par les eaux de pluie en 2010 et 2011 et comparaison aux apports par les PRO lors de l'épandage 2011 en g/ha



## CONCLUSION

2011 constitue la onzième année culturale du site. Il s'agit de la deuxième culture de betterave sucrière dans la rotation. Les principaux résultats obtenus cette année sont les suivants.

### Bilan cultural de la campagne

La complémentation en engrais minéraux NPK n'entraîne pas d'augmentation significative du rendement de betteraves en tonnes de matière sèche à l'hectare. Une augmentation significative de 6 T/ha du rendement net des betteraves en frais est constatée mais uniquement due à une teneur en eau plus élevée.

Dans le sous-essai complétement en engrais minéral, le traitement DVB génère un rendement net frais significativement supérieur aux autres traitements. Dans le sous-essai non complétement, les traitements BOUE et DVB permettent d'obtenir des rendements nets frais significativement supérieurs au témoin. En termes de biomasse sèche de betteraves, les différences entre traitements ne sont pas significatives dans les deux sous-essais.

Concernant les résidus de récolte, la complémentation en engrais minéral augmente significativement la biomasse fraîche et sèche.

Dans le sous-essai fertilisé, les traitements PRO génèrent des biomasses de résidus de récolte, fraîche et sèche, significativement inférieures au Témoin. En revanche, dans le sous-essai non fertilisé, les biomasses fraîches de résidus de récolte sont significativement supérieures au témoin dans tous les traitements PRO. Les biomasses sèches y sont significativement supérieures au témoin pour les traitements BOUE et FUM.

La richesse en sucre en % de la matière fraîche des betteraves est égale entre les deux sous-essais (20,9 %). La complémentation minérale en NPK génère un rendement à 16% de sucre (+ 8 T/ha) et un rendement en sucre extractible (+ 1,2 T/ha) significativement supérieurs, liés à une production de biomasse fraîche supérieure. Ce n'est pas le cas pour le traitement BOUE où la complémentation en engrais K ne conduit pas à plus de rendement à 16% car elle n'augmente pas le rendement frais.

Cette richesse en sucre, proche de 21% sur l'ensemble de l'essai, est élevée. Elle est bien supérieure à ce qui avait été mesuré en 2007 (17,2% en moyenne). La moyenne régionale fournie par la sucrerie d'Erstein est de 18,6% en 2011.

La richesse en sucre élevée n'est pas liée à une carence en azote. Le potentiel de la parcelle semble élevé, et la fin d'été 2011 a connu des conditions climatiques particulières. Les mois de juillet et août pluvieux ont permis d'atteindre des biomasses élevées. Ensuite, le mois de septembre, qui a précédé la récolte, a été très sec et chaud. La sécheresse du sol a occasionné une augmentation de la teneur en sucre des betteraves durant cette période.

Dans le sous-essai complétement en engrais minéral, le taux de richesse en sucre, le rendement à 16% et le rendement en sucre sont significativement supérieurs au témoin dans tous les traitements PRO. Les richesses et rendements en sucre plus faibles dans le témoin avec engrais minéraux peuvent avoir deux explications. Une sur fertilisation du Témoin, corroborée par des reliquats plus élevés après récolte, a pu conduire à une baisse du taux de sucre. Une autre hypothèse pourrait être un retard de maturité par rapport aux traitements PRO, également lié à la fertilisation minérale. La migration des sucres des feuilles vers la betterave n'étant pas terminée à la récolte pour le témoin fertilisé. La biomasse de feuilles en MF et MS est en effet plus élevée dans le témoin.

Dans le sous-essai non complétement, les traitements BOUE, DVB et FUM permettent d'obtenir un rendement à 16% et un rendement en sucre significativement supérieurs au témoin.

Les résultats obtenus en 2011 sur l'essai de Colmar permettent de tirer des conclusions sur la gestion de la fertilisation d'une culture de betteraves incluant des produits résiduels organiques. L'épandage de PRO est compatible avec l'obtention d'excellents rendements en sucre.

Il semble également que le contexte pédologique de l'expérimentation, implantée sur des parcelles de limons profonds, permette d'économiser des engrais minéraux.

## Bilan azoté de la campagne

Les reliquats azotés effectués en **mars 2011**, avant le semis de betterave et trois mois après les épandages de PRO, montrent, dans les deux sous-essais, des stocks significativement supérieurs dans le traitement BOUE par rapport aux autres traitements, dans l'horizon labouré ainsi que dans l'ensemble du profil. Il y a une forte variabilité des teneurs mesurées entre les répétitions intra et inter-parcellaires, générée par des effets pépites dépendants des points de prélèvement. L'augmentation du stock d'azote minéral dans BOUE par rapport aux autres traitements est cohérente avec les flux d'azote minéral apportés par ce PRO lors de l'épandage et une cinétique de minéralisation de l'azote plus rapide.

Dans les deux sous-essais, les stocks d'azote minéral sont également significativement supérieurs au témoin pour les traitements BOUE et DVB dans l'horizon 30-60 cm. BOUE et DVB sont les deux PRO qui apportent le plus d'azote minéral dans l'horizon labouré au moment de l'épandage (environ 40 kg N<sub>minéral</sub>/ha en 2011). Une partie de cet azote minéral a migré vers l'horizon sous-jacent (30-60 cm) durant les trois mois d'hiver.

Après la récolte des betteraves en **octobre 2011**, les stocks sont appauvris dans l'ensemble du profil pour tous les traitements des deux sous-essais. Le témoin fertilisé présente néanmoins des stocks significativement supérieurs aux traitements PRO dans les horizons 30-60, 60-90 et 90-120 cm ainsi que dans l'ensemble du profil (+14 kg/ha par rapport à la moyenne des traitements PRO). Ceci corrobore l'hypothèse d'un léger excès d'apport d'azote minéral lors de la complémentation sur le témoin, accentué par un peuplement de betteraves plus faible. Néanmoins, l'estimation des reliquats d'azote après récolte utilisée pour le calcul de la fertilisation minérale est de 30 kg/ha. Les doses d'azote minéral calculées et apportées sur la culture génèrent un stock légèrement inférieur à cette estimation dans les traitements PRO, et en cohérence sur le témoin.

## Flux de contaminants liés aux eaux de pluie

Seuls les éléments Zn, Cu et Pb présentent systématiquement des teneurs supérieures aux limites de quantification du laboratoire. Contrairement aux années précédentes, les flux de Zn et Cu apportés sont en hausse en 2010 et 2011. Les précipitations humides ont apporté 166 g/ha de Zn sur deux ans, ce qui représente 4 % des apports en Zn par DVB fin 2010, et 17% des flux apportés par BOUE. Les flux en Cu issus des pluies sont de 19 g/ha en deux ans, et représentent 1,2% des apports par DVB et 7% des apports par les fumiers.

L'augmentation des apports en Pb par les eaux de pluie continue. Ils atteignent 12 g/ha en 2010/2011, ce qui constitue des flux supérieurs aux apports par FUM durant la même période, 17% des apports par BOUE et 3% des apports par le traitement DVB.

Les flux de Hg, Cd et B, calculés à partir des valeurs brutes fournies par le laboratoire (< limites de quantification), représentent une part non négligeable des apports par certains PRO. Les flux de Hg sont notamment supérieurs aux apports par les PRO.

## Évolution de la qualité des sols dans l'horizon labouré (0-28 cm) de 2000 à 2010

### → Teneurs en carbone et paramètres agronomiques dans les sols <sup>2</sup>

Les doses de PRO appliquées lors des épandages sont basées sur l'apport d'azote (170 kgN<sub>total</sub>/ha). Les effets des épandages de PRO sur les teneurs en C<sub>org</sub> dans l'horizon labouré ne sont pas ou peu visibles après 5 épandages, ceci étant en partie dû aux forts apports de matière organique dans le sol via les enfouissements de résidus de récolte qui masquent les effets des apports de PRO.

Après 5 épandages, les PRO augmentent les quantités d'éléments nutritifs dans l'horizon labouré, disponibles pour les cultures.

Les apports en K générés par FUM, FUMC et BIO permettent de remplacer des engrais potassiques et les apports en P générés par BOUE et DVB peuvent se substituer aux engrais phosphatés.

<sup>2</sup> Les classements présentés dans les tableaux sont basés sur les groupes homogènes déterminés lors de l'analyse statistique par le test de Newman & Keuls. Par exemple pour Ca dans les sols du sous-essai non complétement : DVB correspond au groupe "a" ; BOUE = TEM = BIO correspond au groupe "ab" ; FUM = FUMC correspond au groupe "b".

Effet de la fertilisation minérale

<b>paramètres agronomiques</b>	<b>Résultats test de Newman &amp; Keuls</b>
CEC	avec fertilisation minérale > sans fertilisation minérale
Ca	avec fertilisation minérale > sans fertilisation minérale
K	sans fertilisation minérale > avec fertilisation minérale
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen	sans fertilisation minérale > avec fertilisation minérale

Effet des PRO dans le sous-essai complétementé

<b>paramètres agronomiques</b>	<b>Résultats test de Newman &amp; Keuls</b>
pH	TEM = FUMC ≥ BIO ≥ FUM = BOUE ≥ DVB
N <sub>total</sub>	BIO ≥ DVB = FUM ≥ FUMC ≥ BOUE = TEM
CEC	DVB = BIO ≥ FUM = BOUE = FUMC ≥ TEM
K	FUM > FUMC > BIO > DVB = TEM = BOUE
Mg	FUM = FUMC > DVB ≥ BIO = BOUE ≥ TEM
Ca	DVB = BIO = BOUE > TEM = FUM = FUMC
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BOUE = DVB > FUM > FUMC = BIO > TEM

Effet des PRO dans le sous-essai non complétementé

<b>paramètres agronomiques</b>	<b>Résultats test de Newman &amp; Keuls</b>
pH	FUMC = TEM = BIO = FUM > DVB = BOUE
K	FUM = FUMC > BIO > DVB > TEM > BOUE
Mg	FUM = FUMC > DVB > BIO ≥ BOUE ≥ TEM
Ca	DVB ≥ BOUE = TEM = BIO ≥ FUM = FUMC
Na	FUMC = BIO ≥ FUM = DVB ≥ BOUE = TEM
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	DVB > BOUE > FUMC = FUM = BIO > TEM

## Bilan du 6<sup>ème</sup> épandage de produits résiduels organiques

Les concentrations en ETM et CTO dans les PRO épandus en 2011 respectent la réglementation.

De manière générale pour l'ensemble des PRO, il y a une forte hausse des teneurs en Co, et, dans une moindre mesure, en Cu. Après une forte hausse en 2009, les teneurs en PCB reviennent à des valeurs similaires à 2007.

Les concentrations et les flux en ETM et HAP dans BOUE sont en diminution par rapport aux épandages précédents. Par contre, pour DVB, l'augmentation des teneurs en ETM déjà observée en 2009 se confirme. Il est le PRO qui apporte les flux en ETM et CTO les plus élevés.

Issu de la même plateforme de compostage qu'en 2009, il y a encore une amélioration de la qualité de BIO concernant les teneurs en ETM. Cependant l'apport de MS étant supérieur, certains flux sont en hausse. C'est également le cas pour les flux de HAP, ainsi que pour les PCB par rapport à la précédente plateforme de compostage dont était issu le produit en 2007.

Les fumiers, issus d'une nouvelle exploitation en 2011, présentent des concentrations en ETM supérieures à ce qui était observé lors des épandages précédents. Les flux de matière sèche, supérieurs pour ces PRO, génèrent des apports en Zn, B, Fe, Mn supérieurs à BOUE, et des flux similaires pour Cd, Co, Cr, Mo et Ni. Les teneurs en HAP et PCB des fumiers sont très faibles et en général inférieures aux limites de quantification du laboratoire.

## Effet des PRO sur les concentrations en éléments majeurs et traces dans les récoltes

### Problème de contamination au laboratoire lors de la préparation des échantillons

Les échantillons de pulpe de betterave (partie exportée) ont eu un comportement inhabituel au moment du séchage à 50°C. Les échantillons, au lieu d'être friables, comme pour la campagne de 2007, étaient, après séchage, particulièrement durs. Le broyage a été difficile et a eu pour conséquence la pollution des échantillons en Cr, Ni, Fe, Co et Mo.

De nouveaux échantillons de pulpe congelée ont été transmis au laboratoire. L'homogénéisation de ce nouvel échantillon n'a pas été possible et un sous-échantillonnage a été fait directement sur la pulpe congelée. Une méthode alternative de mise en solution de l'échantillon permettant de travailler directement sur la pulpe fraîche a été employée. Cette méthode de préparation/analyse a permis d'évaluer les concentrations en Cr, Ni, Fe, Co et Mo.

En raison du sous-échantillonnage, la mesure de la teneur en matière sèche n'a pu être réalisée correctement. Les résultats présentés dans ce rapport pour les éléments Cr, Ni, Fe, Co et Mo sur betteraves du sous-essai complété en engrais minéral sont donc issus de l'analyse sur la pulpe fraîche avec une correction de la teneur en MS. Les résultats présentés ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

### Nouvelle méthode de préparation et de minéralisation des pulpes de betterave à mettre en place pour de prochaines campagnes betterave :

L'homogénéisation de la pulpe de betterave après congélation étant problématique, nous proposons de faire le prélèvement de pulpe pour analyse directement à la sortie de la râpeuse. Ces prélèvements représenteront chacun 5 g de matière fraîche. Des répétitions seront faites. Au final seront fournis au laboratoire, pour chaque parcelle :

- 3 échantillons d'environ 5 g de pulpe de betterave qui seront séchés à 103°C puis calcinés (analyse des éléments majeurs et en traces)
- 1 échantillon d'environ 5 g qui sera séché à 50 °C et minéralisé par la méthode habituelle (analyse de Se).
- 1 échantillon d'environ 5 g qui sera séché à 50 °C (analyse de Hg).

Des essais de faisabilité (validité d'une prise d'essai directe en sortie de pulpeuse) devront être réalisés sur des échantillons de test avant mise en production de cette nouvelle méthode.



### Effet des PRO sur les concentrations en éléments totaux dans les récoltes

Seuls les éléments majeurs ainsi que Fe, Mn, Zn et Cu sont analysés dans les deux sous-essais, avec et sans engrais minéral. Les éléments Al, B, Mo, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Se, As et Hg sont analysés dans les échantillons du sous-essai avec complément en engrais minéral.

Dans les **betteraves** du sous-essai complétementé, les analyses des éléments Mo, Se, Hg et As présentent des résultats inférieurs aux limites de quantification qui ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

Suite au problème de contamination des échantillons de betteraves et à la reprise d'analyse, les teneurs en Fe, Mo, Cr, Ni, et Co dans le sous-essai avec engrais minéral ne font pas l'objet d'une analyse statistique.

Dans les **résidus de récolte**, les valeurs de concentrations en éléments traces sont toutes supérieures aux limites de quantification du laboratoire.

Les biomasses de résidus de récolte plus élevées dans le sous-essai fertilisé génèrent une augmentation significative du stockage de tous les éléments majeurs par les résidus de récolte de betterave par rapport au sous-essai non fertilisé.

Au sein des deux sous-essais, les différences significatives de biomasses observées entre les traitements influent également sur les stocks d'éléments.

#### Différences significatives entre traitements en 2011 sur les **concentrations** en éléments dans le **sous-essai complétementé** en engrais minéral

Élément	Concentrations betteraves	Concentrations résidus de récolte
N	TEM > FUM = BIO = FUMC = DVB = BOUE	TEM > BOUE = FUMC = BIO = FUM = DVB
P		BOUE > FUM = FUMC = TEM = BIO = DVB
K	FUM = TEM = FUMC ≥ DVB = BIO ≥ BOUE	BOUE ≥ DVB = BIO = FUM ≥ FUMC > TEM
Ca		BOUE ≥ DVB ≥ BIO ≥ FUMC = TEM ≥ FUM
Mg	TEM > FUM = FUMC ≥ BIO = DVB ≥ BOUE	
Na	TEM = FUMC = FUM = BIO = DVB > BOUE	FUMC (>T) = BIO = FUM = DVB = BOUE = TEM
Mn		BOUE ≥ DVB ≥ BIO = FUMC = FUM ≥ TEM
Zn	FUMC ≥ TEM = BIO = FUM = DVB ≥ BOUE	DVB = BIO = BOUE ≥ FUM = FUMC ≥ TEM
B		BOUE ≥ DVB = BIO = FUMC = FUM ≥ TEM
Mo	<i>problème de contamination</i>	BIO ≥ FUMC = FUM = BOUE ≥ DVB ≥ TEM
Cd	TEM > DVB = BOUE = BIO = FUM = FUMC	BOUE ≥ TEM = DVB ≥ BIO = FUMC = FUM
Hg	< LQ	BOUE (>T) = DVB = BIO = FUM = FUMC = TEM

#### Différences significatives entre traitements en 2011 sur les **concentrations** en éléments dans le **sous-essai non complétementé** en engrais minéral

Élément	Concentrations betteraves	Concentrations résidus de récolte
N	BOUE > DVB = FUM = BIO = FUMC = TEM	
P	BOUE ≥ DVB ≥ FUM = FUMC ≥ BIO ≥ TEM	
K	FUM = FUMC = BOUE = BIO = DVB > TEM	
Na	BOUE > FUM = BIO = DVB = FUMC = TEM	BOUE ≥ FUM = BIO ≥ DVB = FUMC > TEM
Fe	BOUE > FUMC = DVB = TEM = BIO = FUM	
Mn	TEM ≥ BOUE ≥ DVB = BIO ≥ FUMC ≥ FUM	
Cu	BOUE (>T) = DVB = FUM = BIO = TEM = FUMC	

Différences significatives entre traitements en 2011 sur les **mobilisations** en éléments dans le **sous-essai complétementé** en engrais minéral

Élément	Exportations betteraves	Stockage résidus de récolte
N	TEM > FUM = DVB = BIO = FUMC = BOUE	TEM > FUMC ≥ FUM = BIO ≥ BOUE = DVB
P	DVB = FUM ≥ BOUE ≥ FUMC > BIO = TEM	TEM ≥ FUMC = FUM ≥ BOUE = BIO = DVB
K	FUM ≥ DVB ≥ FUMC ≥ BIO ≥ TEM = BOUE	
Mg	FUM = TEM = DVB = FUMC ≥ BIO ≥ BOUE	TEM > BIO = FUMC = BOUE = DVB = FUM
Na	FUM = FUMC ≥ BIO = DVB = TEM ≥ BOUE	FUMC = BIO = TEM ≥ FUM ≥ DVB = BOUE
Mn	DVB = FUM = BOUE = FUMC ≥ BIO ≥ TEM	
Cu		TEM > FUMC = FUM = BIO = DVB = BOUE
Mo	<i>problème de contamination</i>	BIO = FUMC = FUM ≥ BOUE ≥ TEM = DVB
Cd		TEM > BOUE = FUMC = BIO = DVB = FUM

Différences significatives entre traitements en 2011 sur les **mobilisations** en éléments dans le **sous-essai non complétementé** en engrais minéral

Élément	Exportations betteraves	Stockage résidus de récolte
N	BOUE > DVB = FUM ≥ BIO = FUMC ≥ TEM	BOUE ≥ FUM ≥ DVB = BIO = FUMC ≥ TEM
P	BOUE = DVB ≥ FUM = FUMC ≥ BIO > TEM	BOUE = FUM ≥ DVB = FUMC = BIO ≥ TEM
K	FUM = BOUE = DVB = FUMC = BIO > TEM	FUM ≥ BOUE = DVB = FUMC ≥ BIO > TEM
Mg	BOUE = FUM ≥ FUMC = DVB = BIO ≥ TEM	BOUE = FUM = DVB ≥ FUMC = BIO ≥ TEM
Na	BOUE > DVB = FUM = BIO = FUMC = TEM	BOUE ≥ FUM ≥ BIO = DVB ≥ FUMC > TEM
Fe	BOUE > FUMC = DVB = TEM = BIO = FUM	
Zn		FUM = BOUE = DVB = FUMC = BIO > TEM
Cu	BOUE = DVB = FUM ≥ BIO = FUMC ≥ TEM	BOUE = FUM ≥ DVB = FUMC = BIO ≥ TEM

## Perspectives pour le site de Colmar

### → Programmes scientifiques construits sur les sites du SOERE-PRO

Les sites du SOERE-PRO sont le support de plusieurs projets de thèse s'inscrivant dans des programmes de recherche. Depuis la mise en place des sites du SOERE-PRO, les résultats acquis permettent de préciser certains processus liés aux épandages de PRO en parcelles agricoles.

Le site de Colmar sera, à partir de 2012, le support de trois projets de thèse :

- Thèse sur la disponibilité du phosphore des PRO. Rodolphe Lauer. Directeurs de thèse : Alain Mollier et Christian Morel, UMR TCEM.
- Thèse sur les apports de produits résiduels organiques et le fonctionnement biologique des sols amendés : conséquence sur le bilan environnemental des cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote à l'échelle de la parcelle. Fiona Obriot. Directrices de thèse : Laure Vieublé, AgroParisTech et Sabine Houot INRA-EGC. Programme Européen SNOWMAN Ecosom
- Thèse sur la Caractérisation de la dynamique hydrique et du transport de solutés dans un sol soumis à des apports de produits résiduels organiques. Application au risque de lixiviation du nitrate. Arnaud Isch. Directeurs de thèse : Philippe Ackerer du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHyGeS) et Yves Coquet, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.

Pour ce troisième projet de thèse, concernant la dynamique hydrique et les flux de solutés, le doctorant sera basé à Colmar.

La démarche de travail consiste en des interactions entre des périodes d'expérimentations sur le dispositif PRO du SEAV à l'INRA Colmar (parcelles de plein champ, cases lysimétriques) et des phases de modélisation au LHyGeS à Strasbourg.

L'étude porte sur la dynamique de l'eau dans le sol, sur la base des mesures de teneur en eau et de potentiel hydrique (parcelles et cases lysimétriques), ainsi qu'à l'aide des mesures de lame d'eau drainée au niveau des lysimètres à mèches et des cases lysimétriques. Le projet comprend le suivi du transport d'un soluté inerte conservatif, afin de caractériser les propriétés de transfert du sol et l'impact de l'activité racinaire sur le transport de soluté.

Il comprend également l'étude de la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol, sous l'influence des apports de PRO. Cette dynamique est principalement pilotée par la matière organique et l'activité microbienne du sol, et fortement influencée par la température et l'état hydrique du sol.

La modélisation pourra être étendue, en fin de thèse, au transfert de polluants dans les cases lysimétriques, sous réserve de la disponibilité de mesures fiables de concentrations en sortie des cases.



## BILAN FINANCIER

**PLATEFORME D'EXPERIMENTATION DE LONGUE DUREE (2ème phase - prolongation)  
BILAN FINANCIER CAMPAGNE 2011**

NATURE DES OPERATIONS	PREVISIONS			REALISATION			ECART		
	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	2011 (A10) BET	
	Nombre	Prix unitaire	Total en euros HT	Nombre	Prix unitaire	Total en Euros HT	Nombre	Prix unitaire	Total en Euros HT
<b>ANALYSE DE TERRE</b>									
SOUS TOTAL 1			14 064 €			7 089 €			-6 975 €
<b>ANALYSE DES INTRANTS</b>									
SOUS TOTAL 2			37 818 €			34 420 €			-3 398 €
<b>ANALYSE DES RECOLTES</b>									
SOUS TOTAL 3			25 184 €			17 105 €			-8 079 €
<b>ANALYSE DES PRODUITS TRANSFORMES</b>									
SOUS TOTAL 4			1 740 €			0 €			-1 740 €
<b>SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU</b>									
SOUS TOTAL 5			50 878 €			25 318 €			-25 560 €
<b>RETOMBES ATMOSPHERIQUES</b>									
SOUS TOTAL 6			1 714 €			1 670 €			-44 €
<b>ETUDES ET BILANS ENVIRONNEMENTAUX</b>									
SOUS TOTAL 7			32 807 €			33 800 €			993 €
<b>CONSERVATION DES ECHANTILLONS : ECHANTILLOTHEQUE(sols, Vgtx,...)</b>									
SOUS TOTAL 8			1 500 €			1 030 €			-471 €
<b>TOTAUX ANALYSES ET EQUIPEMENTS (SOUS TOTAUX 1 à 8)</b>			<b>165 705 €</b>			<b>120 430 €</b>			<b>-45 275 €</b>
<b>FRAIS D'EXPERIMENTATION</b>									
SOUS TOTAL FRAIS D'EXPERIMENTATION 9			64 723 €			49 979 €			-14 744 €
<b>SALAIRES PERSONNEL TITULAIRE INRA (HORS ASSIETTE DE FINANCEMENT)</b>									
TOTAL SALAIRES TITULAIRE INRA (HORS ASSIETTE DE FINANCEMENT)			140 084 €			140 084 €			0 €
<b>TOTAL GENERAL DU PROJET 1 à 10</b>			<b>370 512 €</b>			<b>310 493 €</b>			<b>-60 019 €</b>
<b>TOTAL GENERAL DE L'ASSIETTE DE FINANCEMENT 1 à 9</b>			<b>230 428 €</b>			<b>170 409 €</b>			<b>-60 019 €</b>
<b>FRAIS DE GESTION 4% SUR COUT TOTAL PROJET</b>			<b>14 820 €</b>			<b>12 420 €</b>			<b>-2 401 €</b>
<b>COUT TOTAL DU PROJET</b>			<b>385 332 €</b>			<b>322 913 €</b>			<b>-62 420 €</b>



## ACTEURS ET PARTENAIRES

### **L'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA)**

Représentée par **M. BASTIAN** en sa qualité de Président

Contact : *M. Rémi KOLLER (Directeur ARAA)*

*Tél. : 03.88.19.17.52 – Fax : 03.88.19.17.78*

2, Rue de Rome - Schiltigheim

67013 STRASBOURG Cedex

### **Le Syndicat Mixte pour le Recyclage Agricole (SMRA 68)**

Représenté par **M. Michel HABIG** en sa qualité de Président

Contact : *Mme Nathalie VALENTIN (Directrice du SMRA 68)*

*Tél. : 03.89.22.95.70 – Fax : 03.89.22.95.77*

Bâtiment Europe

2, Allée de Herrlisheim

68000 COLMAR

### **L'Agence de l'Eau Rhin Meuse (AERM)**

Représentée par **M. Paul MICHELET** en sa qualité de Directeur Général

Contact : *M. FLUTSCH (Ingénieur Rhin Amont)*

*Tél. : 03.87.34.47.00 – Fax : 03.87.60.49.85*

Rozérieulles – BP 30019

57161 MOULIN-LES-METZ

### **Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)**

Représentée par **M. Bruno LECHEVIN** en sa qualité de Président

Contact : *Mme Fabienne MULLER – Centre d'Angers (Chef Dpt Gestion Biologique et Sol)*

*Tél. : 02.41.20.43.04 – Fax : 02.41.87.43.02*

20, Avenue du Grésillé – BP 90406

49004 ANGERS Cedex 01

### **ARVALIS Institut du Végétal**

Représenté par **M. Gérard MORICE** en sa qualité de Directeur Général

Contact : *M. Alain BOUTHIER (Domaine expérimental du Magneraud 17700 ST PIERRE D'AMILLY)*

*Tél. : 05.46.07.44.65 – Fax : 05.46.07.44.73*

3, Rue Joseph et Marie Hackin

75116 PARIS

### **Syndicat Intercommunal de Traitement des Eaux Usées de Colmar et Environs (SITEUCE)**

Représenté par **M. J.J WEISS** en sa qualité de Président

Contact : *Mme Sylvia MORON (Ingénieur Territorial)*

*Tél. : 03.69.99.55.90 – Fax : 03.69.99.55.94*

32, Cours Saint Anne

68000 COLMAR

### **SEDE Environnement**

Représentée par **M. Hubert BRUNET** en sa qualité de Directeur Développement Qualité

Contact : *Mme Orphélie GARAT (Agence de Colmar à Horbourg)*

*Tél. : 03.89.21.71.71 – Fax : 03.89.41.99.01*

5, Rue Frédéric Degeorges – BP 175  
62003 ARRAS Cedex

### **TERRALYS (anciennement Agro-Développement)**

Représenté par **M. Hugues PECQUEUX** en sa qualité de Directeur de l'Agence Est

Contact : *M. Hugues PECQUEUX*

*Tél. : 03.89.21.97.50 – Fax : 03.89.21.97.51*

6, Rue de la Fecht  
68126 BENNWIHR GARE

### **Centre de Recherche sur la Propreté et l'Energie GIE / CREED**

VEOLIA ENVIRONNEMENT Recherche et Innovation

Représenté par **M. Philippe MARTIN** en sa qualité de Président

Contact : *Mme Anne-Sophie LEPEUPLE (Responsable Pôle Biotechnologies et Agronomie – 78603  
Maison Laffitte)*

*Tél. : 01.34.93.81.20 – Fax : 01.34.93.31.10*

291, Avenue Dreyfus Ducas  
78520 LIMAY

### **Brasseries Kronenbourg**

Représentées par **M. Gilbert BAUER** en sa qualité de Directeur Qualité, Recherche, Développement

Contact : *M. Luc DIDIERJEAN (Manager Recherche)*

*Tél. : 03.88.27.44.88 – Fax : 03.88.27.42.06*

68, Route d'Oberhausbergen  
67200 STRABOURG

### **Région Alsace**

Représentée par **M. Philippe RICHERT** en sa qualité de Président du Conseil Régional d'Alsace

Contact : *Mme Nathalie ARNOLD (chef du service Agriculture – Direction de l'Environnement et de  
l'Aménagement)*

Maison de la Région  
1 Place du Wacken – BP 91006  
67070 STRASBOURG cedex

### **Conseil Général du Haut-Rhin**

Représenté par **M. Charles BUTTNER** en sa qualité de Président

Contact : *Mme Mireille MAYER*

*Tél. : 03.89.30.64.35 – Fax : 03.89.21.64.47*

100, Avenue d'Alsace – BP 351  
68006 COLMAR Cedex



## INDEX DES SIGLES UTILISÉS

- ARAA** : Association pour la Relance Agronomique en Alsace
- CAU** : Coefficient Apparent d'Utilisation
- CTO** : Composés Traces Organiques
- CV** : Coefficient de Variation
- ET** : Ecart-Type
- ETM** : Eléments Traces Minéraux : Al, Fe, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, Co, As, Mo, Mn, B, Ag
- HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques : benzo(a) pyrène (BaP), benzo(b)fluoranthène (BbF), fluoranthène (FLT), benzo(ghi)pérylène (BPE), benzo(k)fluoranthène (BkF), indéno(1.2.3.-cd)pyrène (IPY), acénaphtylène (ANY), acénaphtène (ANA), fluorène (FLU), phénanthrène (PHE), anthracène (ANT), pyrène (PYR), benzo(a)anthracène (BaA), chrysène (CHR), dibenzo(ah)anthracène (DBA), naphtalène (NAP)
- INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique
- LAS Arras** : Laboratoire d'Analyse des Sols INRA Arras
- MS** : Matière Sèche
- PCB** : PolyChloroBiphényles : PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180, 105, 128, 126, 170, 195, 8, 18, 44, 66, 77, 187, 206, 209
- PRO** : Produit Résiduaire Organique
- SADEF** : Société Alsacienne pour le Développement et l'Étude de la Fertilité
- SEAV** : Service d'Expérimentation Agronomique et Viticole
- SMRA 68** : Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin
- USRAVE** : Unité de Service et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales INRA Bordeaux