

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

**REMISE EN CULTURE D'UNE
PARCELLE DE MISCANTHUS EN
AGRICULTURE BIOLOGIQUE:
ACQUISITION DE REFERENCES**

Lucie PETIT

Agronomie, Productions Végétales et Environnement

2017



Landwirtschaftliches
Technologiezentrum
Augustenberg



VetAgro Sup
Mémoire de fin d'études d'ingénieur

**REMISE EN CULTURE D'UNE
PARCELLE DE MISCANTHUS EN
AGRICULTURE BIOLOGIQUE:
ACQUISITION DE REFERENCES**

Lucie PETIT
Agronomie, Productions Végétales et Environnement
2017

Maître de stage : Jürgen RECKNAGEL

Tutrice pédagogique : Nathalie VASSAL



Landwirtschaftliches
Technologiezentrum
Augustenberg



« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du personnel du Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg pour son accueil chaleureux.

Plus particulièrement, je remercie sincèrement Jürgen RECKNAGEL, mon maître de stage.

Je remercie chaleureusement mes collègues d'Emmendingen-Hochburg, Andrea, Stephan, Helmut, Katrin, Franz, Annette et Caroline, pour leur sympathie, leur patience et d'avoir fait de mon stage une expérience enrichissante tant professionnellement qu'humainement.

Je tiens à remercier également Reiner RUSER pour son accueil, sa disponibilité et son aide lors de mon travail à l'Université de Hohenheim, ainsi que Lisa IDLER pour son aide précieuse.

Enfin, j'adresse mes remerciements à Nathalie VASSAL pour son aide et son soutien tout au long de mon stage.

Résumé

Suite à la destruction du Miscanthus, graminée pérenne, des questions sur ses arrières effets se posent. Cette étude s'inscrit dans un contexte particulier de remise en cultures annuelles d'une parcelle de Miscanthus en agriculture biologique avec pour problématique : **Comment évolue la matière organique dans le sol suite à la destruction d'une culture de Miscanthus âgée de 20 ans et à la remise en culture annuelles en agriculture biologique ? Quels sont les arrières effets agronomiques de cette culture dans une succession culturale conduite en agriculture biologique ?**

Ce travail s'appuie sur un dispositif expérimental, situé en Baden-Württemberg, basé sur un système de grandes cultures en agriculture biologique caractéristique de la région. Un protocole de suivi pluriannuel a été mis en place afin de suivre l'évolution de différents paramètres.

Du fait de restitutions de matière organique importantes sous Miscanthus, une augmentation de la teneur en matière organique du sol est observée chaque année en surface, induisant un potentiel de minéralisation de l'azote constant et plus élevé. Le risque de lessivage des nitrates est faible sous Miscanthus. Les effets bénéfiques du Miscanthus semblent ne pas perdurer au-delà de la première année suivant la remise en culture avec une diminution de la teneur en matière organique. Le travail du sol induit une redistribution de la MO sur l'horizon favorisant la minéralisation de l'azote plus en profondeur. Les éléments nutritifs libérés ne semblent pas répondre aux besoins des cultures en place. Enfin, le risque de lessivage des nitrates est beaucoup plus important.

Mots clés : Miscanthus, agriculture biologique, matière organique, dégradation, azote, carbone, succession culturale, remise en culture

Abstract

After the Miscanthus removal, a perennial grass, questions remain about its effects on the following crops. This study is in the line with a particular context which is the recultivation in annual crops of a Miscanthus field in organic farming. The problem is : **what is the evolution of the organic matter in the soil after the removal of a 20 years old Miscanthus plantations and the recultivation in annual crops in organic farming ? What are the agronomic effects of Miscanthus for the following crops in an organic system ?**

This study builds on an experimental system located in the South of Baden-Württemberg and is based on a classical crops succession of the region. An annual monitoring protocol have been created and implemented to follow different parameters.

As a result of important organic matter restitutions under Miscanthus, there is an increase of the soil organic matter level in surface every year that involves a continuous and higher nitrogen mineralisation potential. The nitrate leaching risk is very low under Miscanthus.

The beneficial effects of Miscanthus seem to not continue one year after the Miscanthus removal with a diminution of the soil organic matter level. The tillage involves a redistribution of the organic matter over the soil horizon that enhances the nitrogen mineralisation in this deeper horizon. The nutritive elements released seem to not complete the needs of the established crop. To finish, the nitrate leaching risk is much more important.

Key words : Miscanthus, organic farming, organic matter, degradation, nitrogen, carbon, crop succession, Miscanthus removal

Liste abrégations

C : Carbone

Cinorg : Carbone inorganique

Corg : Carbone organique

Ct : Carbone total

Da : Densité apparente

INN : Indice de Nutrition Azotée

L TZ : Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg

MO : Matière Organique

MOS : Matière Organique du Sol

N : Azote

Nmin : Azote minéral

Nt : Azote total

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
I. CONTEXTUALISATION DE L'ETUDE	2
1. Présentation de la structure d'accueil	2
2. Cadre de l'étude	2
3. L'évolution et la dégradation de la matière organique dans le sol : état des connaissances concernant la MO du Miscanthus.....	3
3.1. La matière organique du sol (MOS)	3
3.1.1. Qu'est-ce que la MOS ?.....	3
3.1.2. Evolution de la MOS	3
3.1.2.1. Minéralisation et humification de la MOS	3
3.1.2.2. Facteurs impactant l'évolution de la MOS.....	3
3.1.3. L'évolution du carbone et de l'azote organiques.....	4
3.1.3.1. Le carbone organique : voies d'assimilation ou minéralisation par les microbes ?.....	4
3.1.3.2. Devenir de l'azote organique : minéralisation et organisation.....	4
3.1.3.3. Humification et stabilisation du carbone et de l'azote	5
3.2. Les enjeux de la matière organique du sol en agriculture biologique.....	5
3.3. Evolution de la biomasse du miscanthus dans le sol	6
3.3.1. Qu'est-ce que le Miscanthus ?.....	6
3.3.2. Quantification et caractérisation de la biomasse restituée au sol.....	7
3.3.2.1. Gestion de la culture : impacts sur les restitutions de biomasse	7
3.3.2.2. Quantification des différents compartiments de biomasse restitués au sol ...	7
a. Biomasse aérienne	7
b. Biomasse souterraine.....	8
3.3.3. Décomposition de la biomasse du Miscanthus dans le sol	8
3.3.3.1. Composition des résidus organiques	8
3.3.3.2. Evolution du carbone	9
a. Minéralisation du carbone	9
b. Stabilité de la MOS et du carbone	10
3.3.3.3. Minéralisation de l'azote.....	10
3.3.4. Evolution de la MOS, du stockage de carbone, de l'azote et des nutriments dans le sol.....	11
3.3.4.1. Enrichissement du sol en MO	11
3.3.4.2. Augmentation du stock de carbone dans le sol	11
3.3.4.3. Evolution de la concentration en azote du sol.....	12
3.3.4.4. Evolution du phosphore et du potassium dans le sol	12
3.3.4.5. Pertes système	12
3.3.5. Evolution des qualités physiques du sol	12

3.3.6. Arrière-effets agronomiques du miscanthus	13
3.3.7. Conclusion	13
4. Problématique de l'étude et hypothèses	14
II. DEMARCHE EXPERIMENTALE.....	16
1 Site expérimental.....	16
1.1. Contexte pédoclimatique	16
1.2. Le dispositif expérimental.....	16
1.2.1. Présentation de l'essai.....	16
1.2.2. Plan du dispositif expérimental	17
2. Matériels et méthodes	18
2.1. Principe de la méthodologie mise en place	18
2.2. Echantillonnages et analyses du sol.....	18
2.2.1. Méthodes d'échantillonnage	18
2.2.2. Analyses des échantillons de sol.....	19
2.2.2.1. Densité apparente du sol	19
2.2.2.2. Suivi de l'évolution de l'azote	19
2.2.2.3. Suivi de l'évolution du carbone	20
2.2.2.4. C/N : un indice de l'évolution de la MO.....	20
2.2.2.5. P et K.....	20
2.3. Echantillonnage et analyse de la biomasse	21
2.3.1. Echantillonnage et analyse	21
2.3.2. Analyse de l'état de nutrition azotée de la culture.....	21
2.4. Estimation des rendements	22
2.5. Risque de pertes du système	22
2.6. Bilan azote : minéralisation nette de l'azote	22
2.7. Traitement des données	22
III. RESULTATS.....	23
1. Evolution quantitative et qualitative de la MOS et de sa dégradation.....	23
1.1. Densité apparente (Da)	23
1.1.1. Variante Miscanthus (M).....	23
1.1.2. Variante Remise en culture (U)	23
1.1.3. Comparaison des deux variantes	23
1.2. Carbone organique.....	23
1.2.1. Variante M.....	23
1.2.2. Variante U.....	24
1.2.3. Comparaison des deux variantes	24
1.3. N total	24
1.3.1. Variante M.....	24
1.3.2. Variante U.....	24

1.3.3. Comparaison des deux variantes	25
1.4. C/N.....	25
1.4.1. Variante M.....	25
1.4.2. Variante U.....	25
1.4.3. Comparaison des deux variantes	25
1.5. Minéralisation de l'azote.....	26
1.5.1. Variante M.....	26
1.5.2. Variante U.....	27
1.5.3. Comparaison des deux variantes	28
1.6. Evolution de l'azote minéral pour la variante U.....	28
2. Disponibilité en éléments nutritifs dans le sol	29
2.1. Utilisation de l'azote par le blé	29
2.2. Evolution de P et K dans le sol	29
2.3. Rendements.....	29
3. Evaluation des pertes du système.....	30
3.1. Variante M.....	30
3.2. Variante U.....	30
3.3. Comparaison des deux variantes.....	30
4. Bilan azote	30
IV. DISCUSSION DES RESULTATS.....	31
1. Quelle est l'évolution quantitative et qualitative de cette matière organique dans le sol ? Comment se dégrade-t-elle ?	31
1.1. Evolution de la MO sous Miscanthus	31
1.2. Evolution de la MO suite à la destruction du Miscanthus et la remise en culture	31
2. Disponibilité en éléments nutritifs et utilisation par la culture	33
3. Y-a-t'il des pertes d'éléments nutritifs dans le système ?	33
4. Minéralisation nette de l'azote.....	34
5. Synthèse	34
V. LIMITES DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES	35
1. Limites de la méthodologie	35
2. Intérêts et limites de l'essai	35
3. Perspectives de travail	35
CONCLUSION	36

Table des figures

Figure 1 Les cycles couplés du carbone et de l'azote dans les sols agricoles (Amougou, 2011)	4
Figure 2 Cycle des nutriments et du carbone durant le cycle de vie du Miscanthus (Chung et Kim, 2012)	6
Figure 3 Accumulation des feuilles sénescentes au sol sur 10 ans (Amougou et al., 2012)	8
Figure 4 Minéralisation du carbone en conditions contrôlées (Beuch et al., 2000)	9
Figure 5 Minéralisation de l'azote en conditions contrôlées (Amougou et al., 2010)	9
Figure 6 Représentation schématique des questions associées à l'étude	15
Figure 7 Vue aérienne du dispositif expérimental (Google Maps).....	16
Figure 8 Dispositif expérimental (photographie personnelle).....	16
Figure 9 Plan du dispositif expérimental.....	17
Figure 10 Représentation des zones de prélèvements par bloc	18
Figure 11 Echantillonnage sol suite à la récolte hivernale du Miscanthus	18
Figure 12 Echantillonnage sol suite à la récolte hivernale du Miscanthus	18
Figure 13 Schéma présentant le protocole annuel, exemple pour l'année en cours.....	22
Figure 14 Evolution moyenne de la densité apparente pour la variante M en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017)	23
Figure 15 Evolution moyenne de la densité apparente pour la variante U en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017).....	23
Figure 16 Evolution moyenne de la quantité de Corg pour la variante M en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017).....	23
Figure 17 Evolution moyenne de la quantité de Corg pour la variante U en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017).....	23
Figure 18 Evolution moyenne de la quantité de Nt pour la variante M en fonction de la profondeur ..	24
Figure 19 Evolution moyenne de la quantité de Nt pour la variante U en fonction de la profondeur...	24
Figure 20 Evolution moyenne du C/N pour la variante M en fonction de la profondeur.....	25
Figure 21 Evolution moyenne du C/N pour la variante U en fonction de la profondeur	25
Figure 22 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante M pour l'année 2015 (moyenne des 4 répétitions) (p<0,001)	26
Figure 23 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante M pour l'année 2016 (moyenne des 4 répétitions) (p<0,001)	26
Figure 24 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante M pour l'année 2017 (moyenne des 4 répétitions) (p<0,001)	26
Figure 25 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante U pour l'année 2017 (moyenne des 4 répétitions) (p<0,001)	27
Figure 26 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante U pour l'année 2016 (moyenne des 4 répétitions) (p<0,001)	27
Figure 27 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante U pour l'année 2015 (moyenne des 4 répétitions) (p<0,001)	27
Figure 28 Evolution de l'azote minéral (kg N/ha) pour la variante "Remise en culture"	28
Figure 29 Courbe de dilution critique de l'azote.....	29
Figure 30 Evolution de la teneur en P ₂ O ₅ et en K ₂ O dans le sol	29
Figure 31 Evolution du Nmin sous Miscanthus (variante M)	30
Figure 32 Evolution du Nmin pour la variante U (remise en culture).....	30

Table des tableaux

Tableau 1 Composition chimique du Miscanthus (Foreid et al., 2004)	8
Tableau 2 Composition des différentes parties du Miscanthus (Amougou et al., 2011).....	8
Tableau 3 Evolution de la quantité de carbone dans le sol suite à la culture de Miscanthus	11
Tableau 4 Caractéristiques granulométriques du sol des parcelles (en %) (Hanemann, 2016).....	16
Tableau 5 Conduite des microparcelles remises en culture suite à la destruction du Miscanthus	16
Tableau 6 Structure de la succession culturale appliquée au dispositif expérimental	18
Tableau 7 Corg moyen total de 0 à 60 cm de profondeur pour les variantes M et U et comparaison entre variantes (Hanneman, 2016; Idler, 2017).....	23
Tableau 8 Evolution du Corg moyen total de 0 à 60 cm de profondeur pour les deux variantes M et U (Hanneman, 2016; Idler, 2017)	23
Tableau 9 Nt moyen cumulé de 0 à 60 cm de profondeur pour les variantes M et U et comparaison entre variantes.....	24
Tableau 10 Différences significatives issues du test Newmann-Keuls de la minéralisation de N entre les différentes profondeurs pour chaque année au jour 35 d'incubation	26
Tableau 11 Différences significatives issues du test Newmann-Keuls de la minéralisation de N entre années pour chaque profondeur (en cm) au jour 35 d'incubation	26
Tableau 12 INN du blé des microparcelles U (variante 2) et de la parcelle de comparaison.....	29
Tableau 13 Rendements pour les microparcelles de la variante U (V2) et pour la parcelle de comparaison.....	29
Tableau 14 Synthèse	34

INTRODUCTION

Miscanthus x giganteus (appelé Miscanthus dans le reste du rapport), est une plante pérenne à rhizomes de type graminée originaire d'Asie (Sacala, 2011). Introduite en Europe dans les années 1930, cette plante, présentant une forte production de biomasse associée à des besoins en intrants faibles, a suscité dans les années 1990 un intérêt pour la production d'énergie renouvelable en offrant une possibilité de substitution à l'utilisation d'énergies fossiles (Hansen et al., 2004). Ainsi le Miscanthus, bien que ce soit une production agricole marginale, a été au cœur de nombreuses études pour sa production de biomasse mais également concernant la dégradation de sa matière organique du fait de restitutions annuelles au sol très importantes.

Implantée pour une durée moyenne de 15 à 20 ans, les effets précédents de cette culture intégrée dans une succession culturale n'ont pour le moment fait l'objet que de peu d'études. La question de la gestion des parcelles suite à la destruction du Miscanthus se pose alors pour les agriculteurs. L'intégration de cette culture dans une succession culturale conduite en agriculture biologique est aussi un point de questionnement, cette culture répond-elle aux enjeux de l'agriculture biologique ?

Le Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) a conduit pendant vingt ans un essai au champ concernant la production de Miscanthus conduit en agriculture biologique. Conscient des enjeux agronomiques également liés à la destruction de cette culture, le LTZ, en association avec l'Université de Hohenheim, a fait le choix de remettre une partie de la parcelle en cultures annuelles afin d'apporter des éléments de réponse à ce questionnement. La présente étude s'inscrit alors dans un contexte de remise en culture annuelle d'une parcelle de Miscanthus en agriculture biologique et s'appuie sur un dispositif expérimental en conditions réelles au champ.

Ainsi la problématique retenue est la suivante : Comment évolue la matière organique dans le sol suite à la destruction d'une culture de Miscanthus âgée de 20 ans et à la remise en culture annuelles dans un contexte d'agriculture biologique ? Quels sont les arrières effets agronomiques de cette culture dans une succession culturale conduite en agriculture biologique ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette problématique, un protocole expérimental pluriannuel a été conçu pour suivre l'évolution de différents paramètres suite à la remise en culture mais également sous Miscanthus.

Une première partie présentant le contexte de l'étude permettra de mieux définir et cerner la problématique et les objectifs retenus pour cette étude. Ensuite, le protocole créé et mis en place sur cet essai sera présenté. Les résultats seront analysés puis discutés. Pour finir, les intérêts, limites et perspectives de travail seront présentés.

I. CONTEXTUALISATION DE L'ETUDE

1. Présentation de la structure d'accueil

Ce travail est réalisé au Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) à l'antenne d'*Emmendingen-Hochburg*. C'est un établissement régional public sous tutelle du Ministère de l'Agriculture du Land de Baden Württemberg en Allemagne. Le LTZ, dont le siège se situe à Karlsruhe, compte plus de 250 employés répartis sur plusieurs sites.

Ses domaines d'expertise concernent la production agricole, la santé des plantes et la qualité des produits. Ainsi ses compétences couvrent plusieurs champs d'activité : l'expérimentation, la réalisation de diagnostics agronomiques ou encore l'analyse de produits (semences, plantes, produits fourragers, sols et fertilisants). L'antenne d'*Emmendingen-Hochburg* a des activités d'expérimentation en agriculture biologique.

Le dispositif expérimental, qui sera présenté par la suite, est conduit en partenariat avec l'Université de Hohenheim, plus particulièrement avec le « Institut für Kulturpflanzenwissenschaften », département « Düngung und Bodenstoffhaushalt ».

2. Cadre de l'étude

Le *Miscanthus*, présentant une forte production de biomasse, a suscité un fort intérêt dans les années 1990 pour la production de bioénergie. Une parcelle de *Miscanthus x giganteus* a ainsi été implantée en 1995 à Müllheim par le IFUL, prédécesseur du LTZ, afin d'étudier la production de biomasse sous conditions de production extensive, c'est-à-dire sans fertilisants et produits phytosanitaires après l'année d'implantation. Cette parcelle a été conduite en agriculture biologique jusqu'à destruction.

En août 2015, après plus de 20 ans d'exploitation du *Miscanthus*, une partie de la culture a été détruite afin d'implanter des cultures annuelles. Ce nouveau dispositif présente plusieurs objectifs :

- La validation d'une méthode innovante pour la remise en culture d'une parcelle de *Miscanthus* après 20 ans sans recours aux herbicides : le *Miscanthus* est une culture difficile à détruire sans recours à un désherbant puissant.
- L'étude des effets précédent du *Miscanthus* et de sa compatibilité avec les exigences de l'agriculture biologique : évolution de la teneur en humus, effets bénéfiques ou négatifs pour les cultures annuelles suivantes (réponse aux besoins, rendements).
- L'étude des effets écologiques du *Miscanthus* : effets sur la lixiviation des nitrates, émissions de gaz à effet de serre.

Le travail présenté par la suite est axé sur l'effet précédent du *Miscanthus* dans une succession culturale conduite en agriculture biologique. L'évolution et la dégradation de la matière organique issue du *Miscanthus* dans le sol sont particulièrement étudiées.

3. L'évolution et la dégradation de la matière organique dans le sol : état des connaissances concernant la MO du Miscanthus

3.1. La matière organique du sol (MOS)

3.1.1. Qu'est-ce que la MOS ?

La matière organique du sol est constituée de la matière organique vivante (matière endogène), des débris d'origines végétale et animale (matière exogène) formant la matière organique fraîche et de la matière organique stable appelée humus (matière endogène) (Jarvis et al., 1996).

L'humus est stable dans le sol du fait notamment de sa protection par son association avec des éléments minéraux du sol vis-à-vis des processus de dégradation microbiens (complexe argilo-humique) et de par sa composition récalcitrante due à une fraction insoluble riche en cellulose, hémicellulose et en lignine (Amougou, 2011).

3.1.2. Evolution de la MOS

3.1.2.1. Minéralisation et humification de la MOS

La matière organique exogène est recyclée ou décomposée sous l'action de la faune et des microorganismes (bactéries et champignons) du sol. Elle évolue selon deux voies : la minéralisation conduisant à la libération d'éléments nutritifs et l'humification ou stabilisation de formes organiques dans le sol.

La minéralisation est un processus de transformation par les microorganismes du sol des matières organiques en éléments minéraux, formes assimilables et disponibles pour les plantes.

L'humification est une réorganisation des matières organiques et des composés issus des dégradations aboutissant à la formation de macromolécules très variables tels que les acides fulviques ou humiques. Cette réorganisation est réalisée par des processus chimiques de polymérisation et de condensation moléculaire catalysés par des enzymes microbiennes. L'humus permet le stockage à long terme des nutriments dans le sol, sous forme assimilable mais non disponible pour les plantes, par adsorption mais également parce qu'il est composé de N, P et K pouvant être libérés lors de sa dégradation (Bot et al., 2005 ; Marschner, Rengel, 2007).

3.1.2.2. Facteurs impactant l'évolution de la MOS

Tout d'abord la composition chimique des résidus végétaux conditionne en partie leur décomposition par les organismes décomposeurs (Jarvis et al., 1996). La matière organique est composée majoritairement de carbone organique mais également d'oxygène, d'hydrogène, d'azote de phosphore ou encore de soufre. Chaque type de résidu organique a une composition chimique cellulaire spécifique. Les éléments présents dans ces cellules végétales sont les suivants : une fraction soluble facilement décomposable constituée d'acides organiques et de composés peptidiques, et d'une fraction insoluble, récalcitrante, composée de polysaccharides (cellulose, hémicellulose) et de lignine (Amougou, 2011).

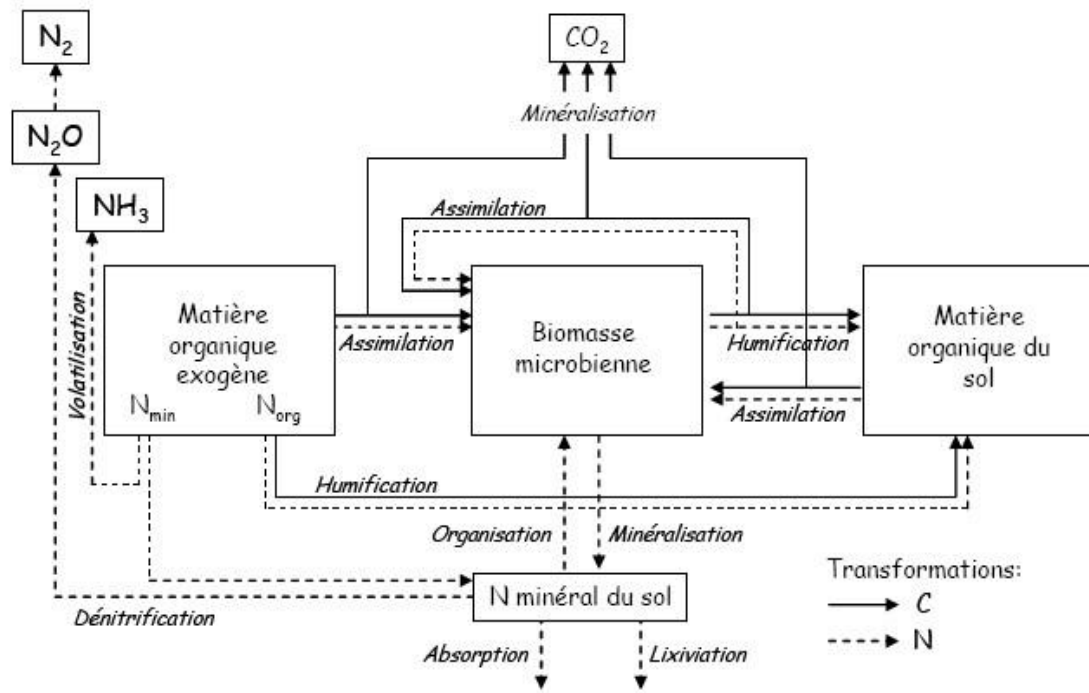


Figure 1 Les cycles couplés du carbone et de l'azote dans les sols agricoles (Amougou, 2011)

Ensuite, les microorganismes ont besoin d'azote pour décomposer les résidus organiques. Les résidus riches en azote (rapport C/N faible) sont minéralisés plus rapidement par les microorganismes. Les résidus pauvres en azote (rapport C/N élevé) entraînent quant à eux un prélèvement d'azote minéral dans le sol par les microorganismes pour leur propre métabolisme. La disponibilité en azote (azote organique des résidus ou du sol, azote minéral du sol) a donc un impact sur le taux et la vitesse de minéralisation et donc sur le taux d'humification (Amougou, 2011 ; Bot et al., 2005).

Enfin les organismes décomposeurs sont également soumis à des facteurs extrinsèques tels que la température, l'humidité ou le pH du sol (Jarvis et al., 1996).

3.1.3. L'évolution du carbone et de l'azote organiques

Les MOS évoluent suite aux processus de dégradation, la minéralisation, et de réorganisation ou de recombinaison, l'humification. Ces processus, représentés par la figure 1, mettent en jeu les cycles du carbone et de l'azote qui sont étroitement liés.

3.1.3.1. Le carbone organique : voies d'assimilation ou minéralisation par les microbes ?

Les microorganismes du sol utilisent des sucres simples comme source d'énergie pour leur métabolisme. Ainsi, ils émettent dans le milieu des enzymes permettant de transformer les sucres complexes (cellulose et hémicellulose) en sucres simples nécessaires à leur fonctionnement. Le carbone de ces sucres, alors intégré dans les cellules des microorganismes, est assimilé c'est-à-dire utilisé par les microorganismes pour leur croissance et la synthèse de leur matériel cellulaire ou alors minéralisé, c'est-à-dire oxydé en dioxyde de carbone CO₂ (Marschner and Rengel, 2007).

3.1.3.2. Devenir de l'azote organique : minéralisation et organisation

Le cycle de l'azote dans le sol est constitué de différents processus de transformation (Amougou, 2011 ; Jarvis et al., 1996).

L'azote organique, sous l'action de la flore microbienne hétérotrophe du sol utilisant des substrats carbonés comme source d'énergie, est transformé en ammonium NH₄⁺, forme minérale qui peut être assimilée par les plantes : c'est la minéralisation brute de l'azote.

L'organisation brute de l'azote est le processus inverse de la minéralisation : la flore microbienne assimile l'azote sous ses différentes formes minérales et le converti dans ses voies métaboliques en azote organique qui sera donc inaccessible aux plantes.

Les résidus riches en azote (rapport C/N faible) entraînent une minéralisation nette de l'azote dans le sol alors que ceux pauvres en azote (rapport C/N élevé) induisent une organisation nette de l'azote (Jarvis et al., 1996).

La nitrification correspond à l'oxydation de l'azote ammoniacal NH₄⁺ en nitrates NO₃⁻ par *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*, bactéries autotrophes. L'ammonium est tout d'abord transformé en nitrites (nitritation) puis ces nitrites sont transformés en nitrates (nitratisation). Ces ions NO₃⁻ sont assimilables par les plantes mais peuvent être également perdus par le système par le phénomène de lixiviation qui est l'entraînement des nitrates dans l'eau drainée, au-delà du front racinaire (Jarvis et al., 1996). L'azote nitrique NO₃⁻ peut être converti en azote gazeux N₂ : c'est la dénitrification (Jarvis et al., 1996).

3.1.3.3. *Humification et stabilisation du carbone et de l'azote*

Les résidus organiques dont la composition est plus récalcitrante (comme ceux riches en lignine) participeraient beaucoup plus à l'enrichissement de l'humus que ceux plus facilement décomposables (Marschner et Rengel, 2007 ; Amougou, 2011).

La décomposition de la matière organique stable est très lente car seuls certains types de microorganismes sont susceptibles d'y parvenir, sous condition de ressources énergétiques suffisantes. Cette énergie peut leur être fournie par l'apport de matière organique fraîche, qui permet alors d'induire aussi la dégradation des MOS récalcitrantes : ce processus est appelé priming effect. Ce phénomène induit un changement dans la cinétique de minéralisation de la matière organique du sol, notamment celle de l'azote organique de la matière organique. C'est un processus naturel ayant lieu dans la rhizosphère et qui n'a pas seulement lieu en conditions d'incubation, résultant d'un accroissement de l'activité microbienne du fait que plus d'énergie est disponible par l'apport de matière fraîche (Fontaine et al., 2003; Kuzyakov, 2010).

3.2. **Les enjeux de la matière organique du sol en agriculture biologique**

Un des objectifs de l'agriculture biologique est de préserver voire d'augmenter les fertilités chimique, biologique et physique des sols.

La fertilité chimique des sols repose sur leur capacité à apporter de l'eau et des éléments nutritifs aux plantes en quantité suffisante afin d'assurer un bon potentiel de production. La disponibilité en nutriments est un point déterminant pour la production en agriculture biologique où l'apport de fertilisation minérale de synthèse est prohibé. Pour cela, les systèmes de production en agriculture biologique sont basés sur les processus biologiques du sol favorisant l'accumulation de matière organique tout en induisant également un habitat favorable aux êtres vivants du sol (fertilité biologique) afin de stimuler leur développement et leur activité. En effet, il est indispensable qu'une activité biologique diversifiée capable de décomposer et de recycler la matière organique s'installe pour fournir aux plantes les éléments nutritifs dont elles ont besoin. En retour, ces plantes produiront de la biomasse qui sera en partie restituée au sol (IFOAM, 1996).

Dans un système biologique, la disponibilité en azote, principal facteur limitant du développement des couverts végétaux est fonction la minéralisation de la matière organique du sol ou par la fixation de l'azote de l'air (IFOAM, 1996).

La matière organique du sol a également un rôle dans la fertilité physique des sols en améliorant leur structure et leur porosité permettant une meilleure aération, perméabilité et plus de facilité pour le développement des racines. La matière organique induit aussi une meilleure rétention en eau des sols (IFOAM, 1996).

Pour conclure les fertilités chimique, biologique et physique, indissociables pour un écosystème agricole performant, sont améliorées en système biologique. Les pratiques en agriculture biologique favorisent un écosystème équilibré permettant d'optimiser les conditions de croissances des couverts végétaux.

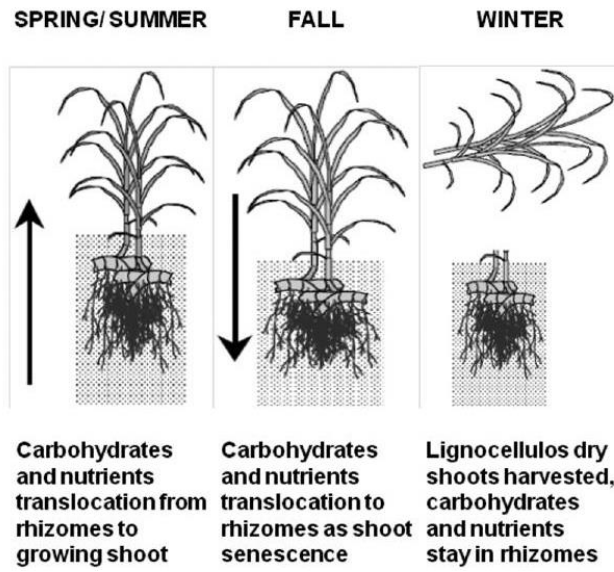


Figure 2 Cycle des nutriments et du carbone durant le cycle de vie du Miscanthus (Chung et Kim, 2012)

3.3. Evolution de la biomasse du miscanthus dans le sol

3.3.1. Qu'est-ce que le Miscanthus ?

Le Miscanthus, dont l'espèce *Miscanthus x giganteus* est la plus étudiée, est une plante pérenne C4 à rhizomes originaire d'Asie. *Miscanthus x giganteus* est une Poacée hybride triploïde, donc stérile, issue du croisement naturel entre *Miscanthus sinensis* et *Miscanthus sacchariflorus*.

Le Miscanthus, récolté annuellement, est généralement implanté pour une durée de 15 à 20 ans. Cette culture s'établit en deux phases : une phase d'établissement de 3 à 5 ans avec une augmentation de la production de biomasse et une phase de production jusqu'à 20 ans présentant une production de biomasse constante pouvant atteindre 20 à 30 t MS/ha/an et jusqu'à 40 t MS/ha/an pour une culture irriguée (Lewandowski et al., 2000 ; Sacala, 2011).

Plante hybride stérile, le Miscanthus est implanté à partir de rhizomes. Au printemps, le Miscanthus démarre son cycle végétatif avec la pousse de nouvelles tiges à partir des rhizomes. Le maximum de biomasse aérienne est observé en fin d'été. A la fin de la croissance des parties aériennes, de nouveaux bourgeons se forment sur les rhizomes pour leur renouvellement partiel. Le Miscanthus entre ensuite en phase de sénescence avec le dessèchement de sa biomasse aérienne (feuilles et tiges) et donc la chute des feuilles. La plante est ensuite la plupart du temps récoltée en sec en fin d'hiver (à partir de février). Elle peut également être récoltée en vert durant l'été (Amougou, 2011 ; Sacala, 2011).

Les rhizomes constituent les organes de réserve des glucides et des nutriments de la plante (comme les protéines et l'amidon). Au printemps, il y a allocation des nutriments des rhizomes vers les parties aériennes pour leur croissance. Puis lors de la sénescence des organes aériens, il y a translocation d'une partie des nutriments et des glucides vers les rhizomes ce qui peut représenter jusqu'à 100 kg N/ha restitués aux rhizomes (cf. figure 2). Ainsi, il n'y a peu de pertes par exportation lors de la récolte, notamment d'azote. Les feuilles, tombées au sol suite à leur dessèchement restituent également des nutriments au sol suite à aux processus de minéralisation (Chung et Kim, 2012 ; Lewandowski et al., 2000 ; Loïc, 2011). Par ce mécanisme, le Miscanthus présente une efficacité élevée en ce qui concerne l'utilisation de l'azote mais également des autres nutriments. Ainsi, c'est une culture ayant de faibles besoins en fertilisation minérale, notamment en azote. L'apport de fertilisation azotée n'augmente en effet pas significativement les rendements de biomasse, en particulier lorsque la culture est en pleine phase de production (Sacala, 2011).

La culture est également très compétitive face aux adventices avec sa croissance rapide ainsi que par la formation d'un mulch au sol, conséquence de la chute des feuilles. L'emploi d'herbicides n'est donc pas nécessaire sauf la première année suivant l'implantation, un traitement herbicide ou un désherbage mécanique favorise en effet le bon établissement de la culture (Lewandowski et al., 2000 ; Sacala, 2011). De plus, en présentant une faible sensibilité aux maladies et peu d'attaques de ravageurs, le Miscanthus nécessite peu d'interventions phytosanitaires (Sacala, 2011).

De par ses faibles besoins en fertilisation et également en traitements phytosanitaires, la production de Miscanthus semble favorisée en agriculture biologique

Le Miscanthus peut être valorisé de multiples manières dépendant de son stade de récolte : précoce en vert ou tardive en sec.

De par son importante production de biomasse, cette plante est très intéressante pour la production de bioénergies. Elle offre donc une possibilité de substitution à l'utilisation d'énergies fossiles ce qui répond aux enjeux mondiaux de réduction des émissions de CO₂ (Hansen et al., 2004). Le Miscanthus est ainsi utilisé pour la production de biocarburant, d'électricité ou de chauffage. Afin d'être valorisé pour la production de bioénergie, le Miscanthus est récolté à maturité en sec, soit en fin d'hiver. La culture a alors sa plus forte teneur en matière sèche et ne nécessite pas d'être séchée, c'est donc à cette période que la biomasse récoltée possède sa production d'énergie nette la plus élevée (Lewandowski et Heinz, 2003).

Le Miscanthus peut être également valorisé à des fins non énergétiques : litières, paillage, dans le bâtiment, pour la production d'emballages, en remplacement du PVC ou encore dans le compostage (ValBiom, 2009).

3.3.2. Quantification et caractérisation de la biomasse restituée au sol

3.3.2.1. Gestion de la culture : impacts sur les restitutions de biomasse

La récolte du Miscanthus généralement tardive, donc après sa sénescence, induit des pertes de biomasse importantes avant la récolte. Selon Beuch et al., (2000), les pertes de pré-récolte représentant en moyenne 26 % de la biomasse aérienne totale soit 4,5 t ha⁻¹ (Kahle et al., 2001). Elles sont constituées de feuilles sénescents (60,7 % des pertes) et des hauts de tige (39,3 % des pertes en moyenne). A ces pertes d'avant récolte s'ajoutent les pertes lors de la récolte. Ainsi, la biomasse récoltée ne représente environ que 50% de la biomasse aérienne totale produite chaque année (Beuch et al., 2000). Il a été déterminé par Kahle et al. (2001) que la globalité des pertes représente de 4,3 à 10,0 t MS ha⁻¹ an⁻¹ soit 2,2-5,0 t C ha⁻¹ an⁻¹ : cette biomasse est alors restituée au sol.

3.3.2.2. Quantification des différents compartiments de biomasse restitués au sol

La biomasse restituée au sol est issue des parties aériennes et souterraines du Miscanthus.

a. Biomasse aérienne

La biomasse aérienne restituée au sol est constituée des pertes de pré-récolte, des feuilles sénescents, des hauts de tiges, et des résidus de récolte. Tous ces résidus accumulés chaque année au sol forment ainsi un mulch, ou une litière en surface, qui se décomposera sur plusieurs années (Dufossé et al., 2014). Il a été mesuré par Amougou et al. (2012) que ce mulch représente une couche de 20 mm de biomasse et constitue un pool considérable de carbone pour le sol. La quantité de restitutions chaque année est dépendante des conditions climatiques (température, vent).

Les feuilles sénescents commencent à tomber dès octobre et ce jusqu'à fin février, ce qui représente une quantité annuelle de 3,0 à 3,1 t ha⁻¹ correspondant à 1,37-1,50 t C.ha⁻¹ et à 16 kg N ha⁻¹ 15,5 ± 3,5 kg N ha⁻¹ pour des plantations de 2 à 3 ans, donc encore en phase d'établissement (Amougou et al., 2012). Néanmoins, des quantités plus importantes ont été mesurées par Dufossé et al. (2014) avec une accumulation de 3,1 t C an⁻¹ dans la litière de surface pour des plantations de 20 ans, donc en pleine production.

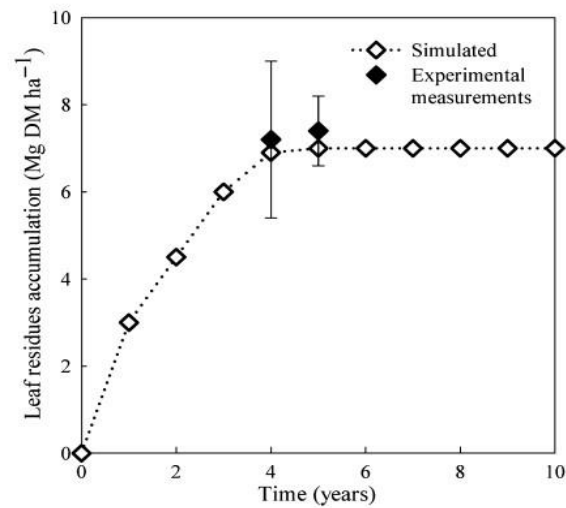


Fig. 5 Simulated amounts (white diamonds with a dashed line) of leaves accumulated on the ground over 10 years and the experimental measurements (black diamonds) obtained at 4 and 5 years after planting. For the experimental measurements ($n = 3$), the error bars represent the standard errors.

Figure 3 Accumulation des feuilles sènes au sol sur 10 ans (Amougou et al., 2012)

Table 2
Chemical characteristics of plant material before and after incubation

	Beginning	End	
		With added nitrogen	Without added nitrogen
Total C (%)	42.57% (2.40)	39.8 (0.10)	32.37 (0.18)*
Total N (%)	0.57% (0.04)	0.93 (0.55)	0.95 (0.57)
$\delta^{13}\text{C}$	-15.81 (1.75)	-12.16 (4.75)	-13.26 (5.35)
Lignin (%)	16.29 (1.03)	20.25 (0.77)*	22.49 (1.75)*

Values are means with standard error in brackets ($n = 5$). * means that the value is significantly different ($P < 0.05$) from the starting value.

Tableau 1 Composition chimique du Miscanthus (Foreid et al., 2004)

Table 3 Nitrogen concentration, NDS soluble, Total sugars and Klason lignin contents in *Miscanthus giganteus* rhizome, necrotic rhizome, root and senescent leaf harvested in year 1 (autumn and winter 2007–2008). Plots received no fertilization (0N) or 120 kg N ha⁻¹ (120N). Treatments with the same letter are undifferentiated ($P \leq 0.05$) by least significant difference (LSD). Data are mean values ($n=2$)

	Nitrogen treatment	Harvest time	Nitrogen (%DM)	NDS soluble	Total sugars	Klason lignin
Rhizome	0N	Autumn	0.7c	24.5c	65.0a	15.9a
		Winter	1.0b	29.6b	61.4a	11.9c
	120N	Autumn	1.1b	28.5b	60.3a	15.4ab
		Winter	1.5a	35.5a	68.0a	13.8b
		LSD	0.3	2.6	16.7	1.6
Necrotic rhizome	0N	Autumn	0.4b	17.3c	59.2a	16.4a
		Winter	0.8a	21.1b	54.7ab	17.0a
	120N	Autumn	0.5b	18.4c	56.1ab	15.9a
		Winter	0.9a	23.2a	52.7b	16.9a
		LSD	0.2	1.1	5.2	1.7
Root	0N	Autumn	0.6c	16.1c	67.9a	20.4a
		Winter	0.9b	17.8bc	65.8a	20.3a
	120N	Autumn	0.9b	19.9b	68.1a	19.0a
		Winter	1.3a	22.8a	64.8a	18.9a
		LSD	0.1	2.1	9.6	2.5
Senescent leaf	0N	Autumn	0.4a	21.7a	51.3a	14.5a
		Winter	-	-	-	-
	120N	Autumn	0.5a	20.6b	54.3a	14.5a
		Winter	-	-	-	-
		LSD	0.1	0.4	7.6	1.3

Tableau 2 Composition des différentes parties du Miscanthus (Amougou et al., 2011)

Ces feuilles s'accumulent ainsi au sol sur plusieurs années. La quantité de feuilles accumulées sur le sol a été simulée par Amougou et al. (2012) et est présentée par la figure 3 : Elle augmente jusqu'à 4 ans de culture (6,9 t ha⁻¹) puis reste constante du fait d'un équilibre entre les apports et la décomposition des feuilles. Les feuilles contribueraient à l'accumulation de 10 MgC.ha⁻¹ dans le sol après 20 ans d'exploitation du *Miscanthus* par estimation.

b. Biomasse souterraine

Les rhizomes et racines constituent la biomasse souterraine du *Miscanthus*.

En fin d'hiver, c'est-à-dire avant la repousse des tiges, au moment où les rhizomes stockent les nutriments, la biomasse souterraine représente 15 à 25 tonnes de MS dont 65 à 89 % issue des rhizomes, dans le cas de *Miscanthus* âgé de 4 à 9 ans (Kahle et al., 2001). Ainsi, en cas de destruction, cette biomasse souterraine représentera une quantité très importante de MO incorporée dans le sol (Dufossé et al., 2014).

Au fur et à mesure des cycles de production de la culture, il y a un turn-over des rhizomes et donc des racines qui y sont attachées. L'étude de Dufossé et al. (2014) montre que cela représente environ 28 t MS ha⁻¹ qui sont restituées aux couches superficielles du sol après 20 ans de culture. Cette biomasse en déperissement, qui augmente d'année en année, apporte donc de la matière organique en continu au sol. En effet, seuls 1 à 4 % des rhizomes meurent et commencent juste leur décomposition après 4 ans de production. Ensuite, en pleine phase de production une mortalité annuelle de 25 % de la biomasse souterraine est observée (Kahle et al., 2001). Ces données sont cependant à contraster. Selon Beuch et al. (2000), la part de rhizomes morts reste très faible les huit premières années, soit au-delà de la phase d'établissement de la culture. Néanmoins, on peut affirmer que plus la culture est âgée plus le turn-over de ses organes souterrains est important et le recyclage de matière organique sol augmente avec des restitutions au sol de 64 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de K et de 60.kg.ha⁻¹.an⁻¹ de N si une mortalité annuelle de 25 % est considérée (Kahle et al., 2001). Selon Beuch et al. (2000), la biomasse souterraine accumulerait 9,1 tC.ha⁻¹ sur le long terme, carbone potentiellement restitué au sol après destruction de la culture.

3.3.3. Décomposition de la biomasse du *Miscanthus* dans le sol

3.3.3.1. Composition des résidus organiques

Avec un ratio C/N élevé de 74,68 (64 pour Dufossé et al. (2014)) et un taux de lignine important (16,29 %), le *Miscanthus* présente une faible dégradabilité (Foreid et al., 2044 ; cf. tableau 1). Néanmoins chaque compartiment de la biomasse à sa propre composition et donc son propre potentiel de dégradabilité (cf. tableau 2).

Les rhizomes étant des organes de réserve, ils ont une fraction soluble (24,5-35,5 % selon Amougou et al. (2011) et 24,7-29 % pour Beuch et al. (2000)) ainsi qu'une concentration en azote de 0,7-1,5 % (Amougou et al., 2011) supérieures à celles des autres résidus organiques. Leur concentration en sucres totaux (cellulose et hémicellulose) varie de 30,3 à 68,0 % en fonction du stade de la plante (Amougou et al., 2011). En effet en hiver, suite à la remobilisation des nutriments par les rhizomes, les concentrations en fraction soluble et en azote des rhizomes augmentent (Amougou, 2011). La teneur en lignine des rhizomes est de 13,8 à 15,9 %. Les rhizomes nécrotiques présentent une concentration en fraction soluble moindre mais une teneur en lignine plus élevée que les rhizomes vivants.

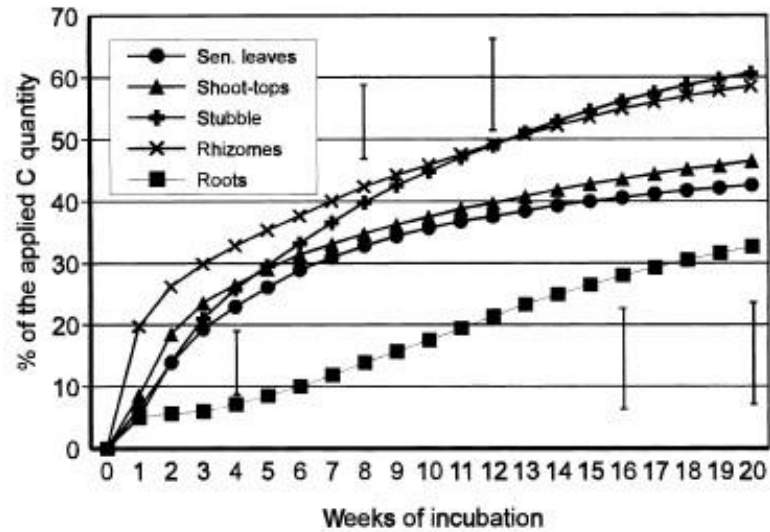


Fig. 2: Course of mineralization of *Mischanthus* biomass residues (averages of two incubation experiments; bars represent least significant differences after 4, 8, 12, 16 and 20 weeks of incubation; $P < 0.05$; Tukey's HSD)

Figure 4 Minéralisation du carbone en conditions contrôlées (Beuch et al., 2000)

Les racines ont une teneur en lignine élevée (18,9 - 20,4 %), une concentration en fraction soluble faible (16,1 – 22,8 %), 0,6 à 1,3 % d'azote et 64,8 - 68,1 % de sucres totaux (Amougou et al., 2011).

Les feuilles sénescents sont caractérisées par une teneur en lignine de 14,5 %, similaire à celle des rhizomes, une fraction soluble de 20,6 à 21,7 %, une concentration en azote de 0,4 à 0,5 %, la plus faible, et 51,3 à 54,3 % de sucres totaux (Amougou et al., 2011).

Les différents organes du *Miscanthus*, riches en lignine et en polysaccharides (cellulose et hémicellulose) semblent donc avoir une composition récalcitrante à leur décomposition par les microorganismes. Néanmoins les rhizomes, avec leur fraction soluble plus importante, semblent être plus facilement décomposables.

3.3.3.2. Evolution du carbone

a. Minéralisation du carbone

Il est important de comprendre comment les résidus aériens et souterrains du *Miscanthus* se dégradent. Du fait de leur composition récalcitrante à la décomposition avec une teneur en lignine plus élevée que celle des résidus de cultures utilisées en systèmes de production de cultures annuelles, les résidus de *Miscanthus* auraient un potentiel de minéralisation plus faible avec donc un stockage de carbone plus important dans le sol (Amougou et al., 2011).

D'après les expérimentations menées par Beuch et al. (2000) sur l'évolution des différents types de résidus de *Miscanthus* et la libération de CO₂, les résidus de récolte (chaumes) présentent le plus fort taux de minéralisation du carbone après 20 semaines d'incubation (60,6 % du carbone est minéralisé), suivi des rhizomes avec 58,5 %, des hauts de tige avec 46,5 %, des feuilles sénescents avec 42,6 % et enfin des racines avec 32,6 % (cf. figure 4). Les résidus de culture et les rhizomes ont une vitesse de dégradation bien plus rapide que les autres compartiments de la biomasse, surtout comparé aux racines qui présentent une vitesse de minéralisation faible.

Amougou et al. (2011) montre des résultats similaires et suivant la même hiérarchisation : après 263 jours d'incubation, la minéralisation nette du carbone est significativement plus élevée pour les rhizomes avec 59,4 % du carbone minéralisé, puis 50,7% pour les rhizomes nécrotiques, 52,6 % pour les feuilles sénescents et enfin seulement 30,0% pour les racines.

La minéralisation du carbone des rhizomes est similaire à celles de certaines parties aériennes de cultures annuelles telles que la paille de blé ou le colza avec une décomposition très rapide au début due à la forte teneur en fraction soluble puis plus lente pour la décomposition des éléments plus récalcitrants (cellulose, hémicellulose) (Amougou, 2011 ; Beuch et al., 2000).

La décomposition des racines, faible et lente, est comparable à celle des racines de maïs avec une importante quantité de carbone non décomposable due à une composition intrinsèque récalcitrante et à une architecture tissulaire complexe (Amougou, 2011).

Les feuilles sénescents présentent une décomposition intermédiaire entre les rhizomes et les racines du fait d'une teneur en lignine et en fraction soluble intermédiaire

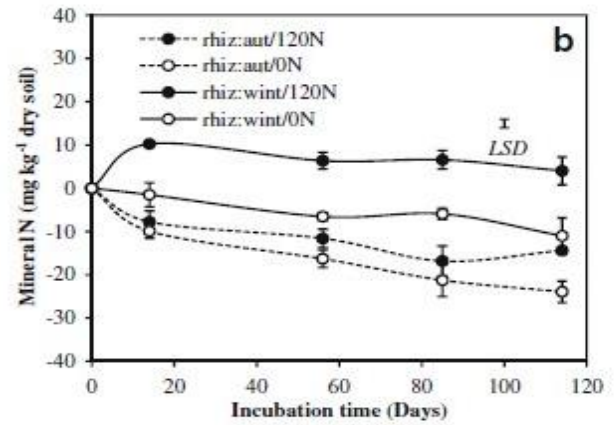
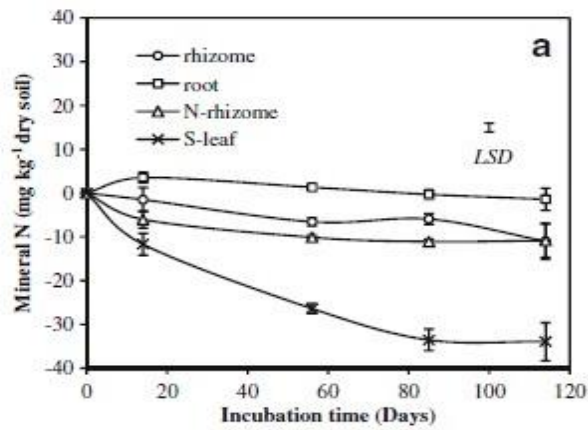


Fig. 2 Net changes in soil mineral N contents during 114 days of decomposition for: a rhizome, necrotic rhizome, root and senescent leaf harvested in winter in the 0N plots and b

rhizome from autumn/0N, autumn/120N, winter/0N and winter/120N. Treatments are undifferentiated ($P \leq 0.05$) by least significant difference (*LSD*). Data are mean values ($n=3$)

Figure 5 Minéralisation de l'azote en conditions contrôlées (Amougou et al., 2010)

La fraction soluble serait corrélée positivement à la minéralisation du carbone alors que la teneur en lignine aurait une corrélation négative avec ce processus. Le ratio lignine/sucres totaux rendant compte des interactions entre la lignine et les polysaccharides (cellulose et hémicellulose) dans le réseau pariétal des cellules végétales peut également être un indicateur du potentiel de minéralisation des résidus. Ce ratio est particulièrement intéressant pour les rhizomes, organes de réserve, car leurs composés polysaccharidiques sont sous forme cytosolubles, alors que ce n'est pas le cas pour les racines (Amougou et al., 2011).

Il a été montré par Foereid et al. (2004) que l'addition d'azote inorganique n'a pas d'impact sur la minéralisation du carbone des litières du *Miscanthus*. Cela entre en contradiction avec l'hypothèse que la diminution du rapport C/N favoriserait la minéralisation des résidus. Néanmoins Amougou et al. (2012), a constaté qu'une disponibilité forte en azote augmente la vitesse de formation du carbone microbien total et donc de la minéralisation de l'azote. En ce qui concerne les feuilles sénescents, une forte disponibilité en azote augmente la vitesse de minéralisation du carbone de 20 % par rapport à des conditions limitantes. Les microorganismes ont en effet besoin d'énergie pour dégrader la MO, ce qui témoigne d'un phénomène de priming effect.

b. Stabilité de la MOS et du carbone

D'après les observations de Foereid et al. (2004), le temps moyen de résidence de la MO, mais surtout du carbone dans le sol augmente avec l'âge de la plantation de *Miscanthus*. Après 11 ans de *Miscanthus* 18 % du carbone du sol provient du *Miscanthus*, alors qu'après 18 ans le carbone du sol est issu à 28 % du *Miscanthus*. L'explication avancée par Kahle et al. (2001) est qu'il y aurait une augmentation de la teneur en carbone insoluble dans la MOS, ce qui la rendrait plus stable face aux attaques microbiennes.

Selon Amougou (2011) les racines, ayant une forte teneur en lignine, sont les résidus organiques présentant le plus fort potentiel de stockage du carbone dans le sol. Néanmoins, il affirme par la suite que les feuilles sénescents, avec un potentiel de $0,50 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ d'accumulation de carbone dans le sol ou $10 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ en 20 ans, offrent un potentiel de stockage de carbone dans le sol plus important que les racines (Amougou et al., 2012).

Foereid et al. (2004) a mis en évidence un accroissement de la dégradation de l'humus après l'ajout de résidus organiques, donc de MO fraîche, ce qui témoigne d'effets priming.

3.3.3.3. Minéralisation de l'azote

L'étude de la minéralisation d'azote, permettant de déterminer la quantité d'azote minéralisée, est un indice de la fourniture en azote par sol, bien qu'à considérer avec prudence

Amougou et al. (2011) a montré en conditions d'incubation une minéralisation négative de l'azote pour tous les compartiments de biomasse du *Miscanthus* excepté les racines, soit une immobilisation nette de l'azote (cf. figure 5). La minéralisation de l'azote des racines bien que positive est très faible avec $+4 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ au quatorzième jour d'incubation. Les feuilles sénescents présentent quant à elle la plus forte immobilisation d'azote avec $-35 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ de sol sec au jour 90. L'apport d'azote et la date de récolte ont cependant un effet significatif sur la minéralisation nette de l'azote. Les rhizomes ayant reçu 120 unités d'azote et récoltés en hiver, donc présentant une teneur plus élevée en azote, présentent une minéralisation nette de l'azote positive ($+4$ -à- $+10 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ de sol sec), tout comme les racines récoltées en hiver et avec apport d'azote. Il existe donc une corrélation positive entre la concentration en azote et la minéralisation.

Evolution de la teneur en carbone	Durée de la culture de Miscanthus	Etude
+ 14 t C.ha ⁻¹	16 ans	Hansen et al. (2004)
+ 8,9 ± 2,4 t C.ha ⁻¹	15 ans	Clifton-Brown et al. (2007)
+ 13 t C.ha ⁻¹	20 ans	Dufossé et al (2014)

Tableau 3 Evolution de la quantité de carbone dans le sol suite à la culture de Miscanthus

Ces résultats sont similaires à ceux présentés par Beuch et al. (1998). En conditions contrôlées, c'est-à-dire simulant l'enfouissement de la biomasse dans le sol, les différents compartiments de biomasse présentent une immobilisation nette de l'azote, donc il y a consommation d'azote ou immobilisation de cet azote. Seule différence, ce sont les racines avec apport d'azote et les parties vertes, biomasse jeune plus riche en azote (mais non restituée au sol), qui présentent une minéralisation positive de l'azote. Il a également été montré par Beuch et al. (1998) que la biomasse qui n'est pas enfouie (feuilles sénescentes, pertes) alors celle-ci, formant un mulch en surface, ne réagira pas avec le sol et donc formera de l'humus.

L'azote issu de la dégradation de la MO du *Miscanthus* est donc principalement consommé par les microorganismes ou immobilisé. La libération d'azote minéral disponible dans le sol pour les plantes serait donc infime suite à la minéralisation primaire de l'azote, la minéralisation de l'humus serait donc à étudier.

3.3.4. Evolution de la MOS, du stockage de carbone, de l'azote et des nutriments dans le sol

3.3.4.1. Enrichissement du sol en MO

Un enrichissement en matière organique du sol, principalement dans la couche supérieure du sol (0-30 cm), a été constaté par toutes les études menées sur la MO issue du *Miscanthus*. Pour des plantations de 6 à 8 ans, il a été observé une augmentation la MO d'environ 0,5 % pour les sols sableux et de 0,2 % pour les sols limoneux (Beuch et al., 2000). Le stockage de MO dans la couche supérieure est en moyenne supérieur de 11,1 t.ha⁻¹ pour les parcelles avec *Miscanthus* par rapport à celles sans, et ce pour différents types de sol (Luvisol, Cambisol, Phaeozem) et après 4 à 9 ans de *Miscanthus* (Kahle et al., 2001). Pour ces mêmes plantations, un accroissement de la MO de 0,5-1,2 g.kg⁻¹.an⁻¹ est estimé si on considère un taux de décomposition microbienne de 50 %. Enfin, pour une parcelle de 10 ans, un enrichissement de 15,5 t.ha⁻¹ a été mesuré ce qui est similaire aux autres résultats (Kahle et al., 2002).

Kahle et al. (2001) émet également l'hypothèse que l'enrichissement en MO du sol continue suite à la période de culture du *Miscanthus*, du fait que ce soit une culture pérenne et de ses restitutions de biomasse chaque année.

3.3.4.2. Augmentation du stock de carbone dans le sol

L'enrichissement indéniable du sol en MO, se traduit par une augmentation du stock de carbone, car c'est le constituant principal de cette MO. Cette augmentation du carbone total, présentée par le tableau 3, et mise en évidence pour une large gamme de sols, est principalement relevée dans les couches superficielles du sol.

Il y a également un enrichissement du sol en carbone organique significatif : + 2,0 g.kg⁻¹ après 9 ans relevé par Kahle et al. (2001) et + 0,29 % après 10 ans selon Kahle et al. (2002)

3.3.4.3. Evolution de la concentration en azote du sol

Suite à une culture de *Miscanthus*, une déplétion en azote du sol est supposée du fait de la consommation de la plante et de l'absence de fertilisation lors de l'exploitation. Néanmoins cette hypothèse n'est pas vérifiée. Kahle et al. (2001) a mesuré une augmentation moyenne de l'azote total de + 0,2 g.kg⁻¹ après 9 ans de *Miscanthus* pour différents sols sableux (Luvisol, Cambisol), puis après 10 ans une augmentation de 0,03 % de l'azote total (Kahle et al., 2002). Après 20 ans de *Miscanthus*, aucun changement significatif (+ 0,12 t N en 20 ans) dans la quantité de stockage d'azote n'a été relevé par (Dufossé et al., 2014) rapport à une parcelle conduite en cultures annuelles.

3.3.4.4. Evolution du phosphore et du potassium dans le sol

L'évolution des quantités de phosphore et de potassium dans le sol sous *Miscanthus* est peu étudiée. Il est supposé que ces concentrations diminuent due à l'absence de fertilisation et aux exportations importantes (tiges) chaque année. Néanmoins les études montrent des résultats contrastés. Kahle et al. (2001) a mis en évidence une augmentation du stock de potassium de 60 kg.ha⁻¹.an⁻¹ (après 9 ans de *Miscanthus*), tout comme Beuch et al. (2000) après 8 ans de *Miscanthus*, du fait des importantes restitutions de biomasse. Néanmoins, Dufossé et al. (2014) a constaté une diminution de 1,2 t.ha⁻¹ après 20 ans de *Miscanthus*. Il explique cela par l'absence de fertilisation pendant 20 ans ainsi que des exportations annuelles dues aux récoltes.

En ce concerne le phosphore, Beuch et al. (2000) n'a pas mis en évidence d'évolutions significatives de sa concentration sous *Miscanthus* alors que Dufossé et al. (2014) a observé une diminution d'environ 100 kg.ha⁻¹ suite à 20 ans de *Miscanthus*.

3.3.4.5. Pertes système

La lixiviation des nitrates dépend de la quantité d'eau drainée, de la quantité d'azote minéral dans le sol en début d'hiver, du type de sol mais également de l'âge de la plante. D'après Lesur et al. (2014), les nitrates lixiviés sous *Miscanthus* (en moyenne 6 kg N.ha⁻¹ pour une concentration moyenne de 50 kg d'azote minéral par hectare) et la concentration en nitrates dans les eaux de drainage (en moyenne 12 mg.L⁻¹) varient selon les paramètres cités précédemment mais restent toujours très faible du fait d'une absorption en continu de l'azote. L'effet de l'âge de la culture est cependant le plus significatif : du fait d'un développement lent de la culture, le risque de lixiviation est plus important le premier hiver suivant l'implantation.

3.3.5. Evolution des qualités physiques du sol

Les propriétés physiques du sol sont également impactées par la culture de *Miscanthus*. Selon Kahle et al. (2002) et Dufossé et al. (2014) la densité apparente est inférieure sous *Miscanthus* par rapport à des parcelles conduites en cultures annuelles, néanmoins elle est homogène pour les différents horizons de sol. En effet, la quantité de carbone organique du sol est négativement corrélée à la densité apparente. Il a également été constaté par Kahle et al. (2002) une augmentation significative de la capacité d'échange cationique correspondant à l'augmentation de la MO sous *Miscanthus*, une augmentation de la porosité avec l'augmentation générale de la taille des différents pores, ainsi qu'une augmentation de la capacité de rétention d'eau du sol.

3.3.6. Arrière-effets agronomiques du miscanthus

Les effets d'une culture de 20 ans de miscanthus et de sa destruction ont été étudiés par l'INRA (Dufossé et al., 2014). Ainsi, si aucun effet significatif n'a été relevé sur le rendement du blé suivant le Miscanthus, la distribution de l'azote dans la biomasse aérienne a été impactée. Le blé suivant Miscanthus présente une concentration en N dans sa biomasse aérienne similaire à celle d'un blé dans une rotation conventionnelle témoin. Néanmoins le blé témoin a une concentration en azote répartie de manière homogène dans ses parties aériennes alors que le blé suivant Miscanthus a une teneur en azote dans ses pailles plus élevée et plus faible dans ses grains due à une mauvaise translocation des réserves. Le précédent Miscanthus engendre des difficultés pour l'implantation du blé ce qui se traduit par une plus faible densité racinaire (Dufossé et al., 2014). Cette difficulté d'implantation des cultures suivante est appuyée par Kahle et al. (2002) : après destruction du Miscanthus suite à la récolte de février, le semis d'une culture suivante n'a été possible que fin août et après destruction mécanique et emploi de glyphosate.

3.3.7. Conclusion

La culture de Miscanthus est à l'origine d'un net enrichissement du sol en matière organique et de ce fait une augmentation du stock de carbone. Cet enrichissement est observé principalement pour les horizons de surface : pour les trente premiers centimètres de sol pour Kahle et al. (2001), pour les quinze premiers centimètres pour Dufossé et al. (2014)

Ces changements dans les caractéristiques du sol ne sont cependant induits que quelques années après l'implantation mais sont susceptibles de continuer suite à la destruction du Miscanthus. En effet, cette plante pérenne met quelques années à arriver à maturité. Durant cette phase d'établissement, les restitutions de matière organique au sol sont plus faibles que lors de la phase de pleine production. Le turn-over des organes souterrains est également très faible durant ces années de mise en place (Beuch et al., 2000). De plus, les résidus organiques du Miscanthus, de nature récalcitrante, ont une dégradation plus lente et plus faible que les résidus de cultures de systèmes de production classiques (cultures annuelles). En ce qui concerne l'azote, on ne peut pas conclure à une évolution significative de la quantité de cet élément dans le sol. Il en est de même pour le phosphore et le potassium.

La culture de Miscanthus est donc en adéquation avec les enjeux de l'agriculture biologique qui sont d'améliorer la fertilité des sols, notamment au travers de leur enrichissement en MO. La fourniture d'azote aux plantes suite à la dégradation des résidus organiques de Miscanthus n'est cependant pas avérée et dépend principalement du fonctionnement biologique des sols et de la dégradation de l'humus (effets priming). Cela rend donc la gestion de l'azote difficile par les agriculteurs dans un tel système impliquant un pilotage de la minéralisation secondaire de l'azote.

Les effets à long terme du Miscanthus sur le sol, notamment suite à sa destruction, et sur les cultures suivantes également, sont cependant très peu étudiés du fait d'un impact agricole marginal. Les références disponibles, la plupart issues d'expérimentation en laboratoires, ne permettent que de mettre en évidence des tendances d'évolution

4. Problématique de l'étude et hypothèses

Jusqu'à présent, la majorité des études portant sur la matière organique du Miscanthus avait pour objectif de déterminer la dégradabilité des différents organes de cette plante. Ces études menées en conditions d'expérimentation, donc contrôlées, et pendant la mise en place du Miscanthus, n'apportent pas d'éléments de réponse concrets quant à l'intégration du Miscanthus dans une succession culturale.

Le présent travail s'appuie quant à lui sur un suivi de parcelles en conditions réelles. Il s'inscrit dans un contexte particulier de remise en cultures annuelles (céréales, légumineuses) d'une parcelle en agriculture biologique suite à la destruction d'une plantation de Miscanthus de 20 ans d'âge conduite également en agriculture biologique. Pendant les 20 ans d'implantation du Miscanthus, durée d'implantation maximale de la plante (Lewandowski et al., 2000), puis à la destruction, il y a eu de fortes restitutions de matière organique au sol (organes aériens et souterrains). Cet important apport de matière organique au sol pose la question des arrières effets agronomiques sur les cultures suivantes et donc de l'intégration du Miscanthus dans une succession culturale conduite en agriculture biologique.

Cette étude s'appuie sur un dispositif expérimental situé dans le Sud de la Baden-Württemberg en Allemagne, donc dans un contexte pédoclimatique particulier. Ce dispositif est basé sur un système de grandes cultures (céréales d'hiver, légumineuses) correspondant aux cultures classiques de la région et conduit en agriculture biologique.

Ce travail a donc pour visée d'apporter des éléments de réponse et des références aux agriculteurs se questionnant sur la gestion des parcelles en agriculture biologique suite à la destruction d'une plantation de Miscanthus mise en place pendant une longue période.

La problématique retenue est donc la suivante :

Comment évolue la matière organique dans le sol suite à la destruction d'une culture de Miscanthus âgée de 20 ans et à la remise en culture annuelles dans un contexte d'agriculture biologique ? Quels sont les arrières effets agronomiques de cette culture dans une succession culturale conduite en agriculture biologique ?

Ainsi, il en découle le questionnement suivant :

- **1. Quelle est l'évolution quantitative et qualitative de cette matière organique dans le sol ? Comment se dégrade-t-elle ?**

Suite à 20 ans de Miscanthus, on suppose un enrichissement du sol en matière organique (Beuch et al., 2000 ; Kahle et al., 2001) qui perdure quelques années après la destruction.

De plus, les hypothèses émises concernant la minéralisation du carbone des échantillons de sol en conditions contrôlées sont les suivantes :

- La minéralisation de l'azote diminue avec la profondeur sous Miscanthus du fait d'une teneur en MO plus élevée pour les horizons de surface (Kahle et al. 2001; Dufossé et al., 2014).
- La première année (2015, donc avant la destruction du Miscanthus), il n'y a pas de différence entre les deux variantes « Miscanthus » et « remise en culture ».

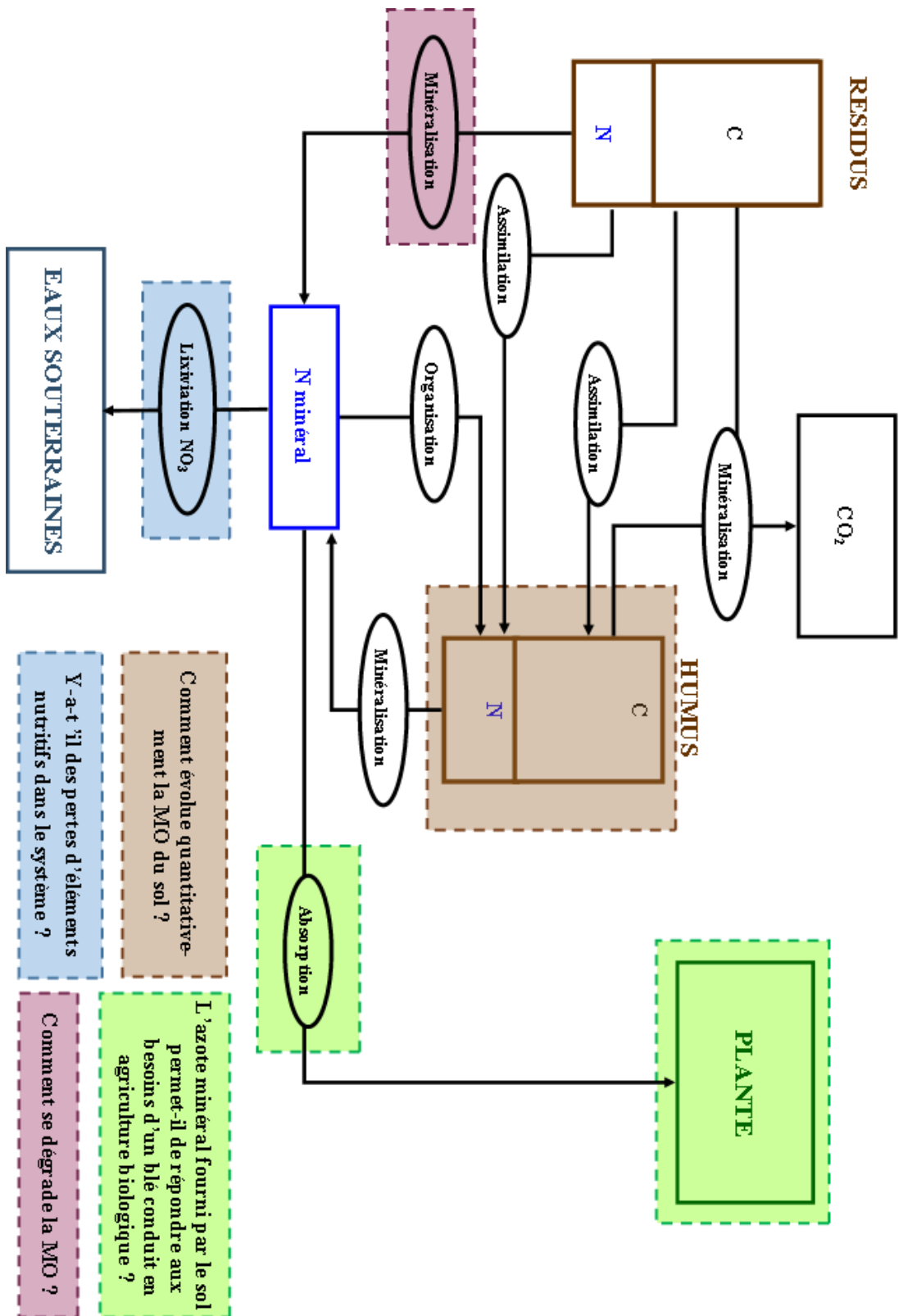


Figure 6 Représentation schématique des questions associées à l'étude

- Pour l'année 2 (2016), suite au travail du sol à la destruction du Miscanthus, il y a une redistribution de la MO vers les horizons plus profonds, donc une augmentation de la minéralisation de l'azote en profondeur et une diminution en surface
 - Pour l'année 3 (2017), il y a une diminution de la minéralisation de l'azote pour les parcelles « remise en culture » du fait d'une diminution des apports en MO.
- **2. L'intégration de cette production dans une succession culturale en agriculture biologique permet-elle de satisfaire les besoins nutritionnels de cultures annuelles par la libération d'éléments nutritifs suite à la dégradation des résidus de culture de Miscanthus ?**

En effet, l'un des enjeux de l'agriculture biologique est d'assurer la disponibilité en nutriments pour les couverts végétaux sans avoir recours à des intrants chimiques. On s'intéresse plus particulièrement à l'azote dans cette étude : l'azote minéral fourni par le sol permet-il de répondre aux besoins d'un blé conduit en agriculture biologique ?

Suite à la culture de Miscanthus et à ses importantes restitutions de MO au sol, on suppose une libération d'éléments nutritifs dans le sol qui seraient disponibles pour les cultures suivantes et répondraient à leurs besoins.

3. Y-a-t'il des pertes d'éléments nutritifs dans le système ?

On s'intéresse dans cette étude aux deux périodes de pré- et post-destruction du Miscanthus au travers de la lixiviation des nitrates.

Suite à la culture du miscanthus, on suppose des pertes par lixiviation de nitrates très faibles voire négligeables. Le risque de lixiviation sous Miscanthus étant très faible, on suppose que cela perdure quelques années suivant sa destruction.

La figure 6 représente de façon schématique les questions soulevées par cette étude en s'appuyant sur une représentation globale de la dégradation de la matière organique et des cycles de l'azote et du carbone.

L'objectif à long terme de dispositif est d'acquérir des références sur l'évolution de la matière organique suite à la culture de Miscanthus afin d'optimiser la valorisation des nutriments dans une succession culturale conduite en agriculture biologique par :

- L'utilisation la plus importante possible par les cultures
- La recherche de la réduction des pertes dans le système

L'évolution de la MO et les processus de dégradation en jeu étant à considérer sur plusieurs années, il est essentiel que le dispositif expérimental et le protocole expérimental associé s'inscrivent dans la durée. C'est pourquoi un protocole expérimental de suivi à long terme de ce dispositif, donc pluriannuel, a été créé afin d'analyser à long terme les paramètres permettant d'apporter les éléments de référence sous-jacents aux questions présentées précédemment.

	Profondeur (cm)	Wasserloch	Parcelle de comparaison
Argile (< 2 μm) en %	0-10	17,1	14
	10-20	17,31	13,6
	20-30	18,1	16,2
	30-40	20	19,6
	40-50	22,2	22,2
Limon (2-63 μm) en %	0-10	72,4	76,2
	10-20	72,4	76,9
	20-30	73,2	75,6
	30-40	72,6	73,8
	40-50	72,6	71
Sable (63-2000 μm) en %	0-10	10,6	9,9
	10-20	10,3	9,6
	20-30	9,6	8,4
	30-40	7,5	6,6
	40-50	7,5	7

Tableau 4 Caractéristiques granulométriques du sol des parcelles (en %) (Hanemann, 2016)



Figure 7 Vue aérienne du dispositif expérimental (Google Maps)



Figure 8 Dispositif expérimental (photographie personnelle)

II. DEMARCHE EXPERIMENTALE

1 Site expérimental

1.1. Contexte pédoclimatique

Le site expérimental faisant l'objet de cette étude est la parcelle Wasserloch située à Müllheim, dans le Sud-Ouest de l'Allemagne en Baden Württemberg. Cette parcelle, se situant à une altitude de 224 m, est exposée à une température moyenne de 11,5°C et à des précipitations moyennes de 711,3 mm/an (station météorologique du LTZ, moyennes de 2008 à 2016). Le sol est de type « Parabraunerde aus Löß », c'est-à-dire un sol brun calcaire issu de Loess. C'est un sol limono-argileux avec un indice de qualité de 70 ce qui correspond à un sol de bonne qualité (cf. tableau 4). Il s'agit d'un sol profond, meuble et peu compact présentant un ressuyage rapide, un risque de lessivage limité ainsi qu'une réserve utile et une hydromorphie correctes (Région Alsace, 1999).

A 70 mètres de la parcelle d'essai, se trouve une parcelle conduite en agriculture biologique depuis une quinzaine d'années, en cultures annuelles et sans précédent *Miscanthus* (cf. figure 7). Elle est utilisée par l'Université de Hohenheim comme parcelle de comparaison. Elle présente un sol similaire à la parcelle de Wasserloch (cf. tableau 4). Il n'y a en effet pas de différence significative entre ces deux parcelles pour la teneur en argile ($p=0,370$), en limon ($p=0,068$) et en sable ($p=0,310$) (cf. annexe 1).

1.2. Le dispositif expérimental

1.2.1. Présentation de l'essai

La parcelle Wasserloch a été implantée en *Miscanthus x giganteus* en 1995. La culture a été conduite en conditions de production extensive et en agriculture biologique, c'est-à-dire sans fertilisants et produits phytosanitaires après l'année d'implantation. Suite à une récolte habituelle en mars 2015, la parcelle a été divisée en 8 microparcelles dont 4 ont été à nouveau récoltées au stade « jeune », en vert, en juillet 2015. Après la destruction mécanique en août 2015 du *Miscanthus*, sans usage de produits phytosanitaires, ces 4 microparcelles ont été remises en cultures annuelles. Depuis la destruction du *Miscanthus*, ces parcelles ont été conduites en agriculture biologique, sans fertilisation ni traitements phytosanitaires. La conduite de ces parcelles, illustrée par la figure 8, est présentée par le tableau 5.

Date	Itinéraire cultural
Août 2015	Division de la parcelle en 8 microparcelles
	Récolte en vert du <i>Miscanthus</i>
	<ul style="list-style-type: none">• Destruction mécanique du <i>Miscanthus</i> : broyage et enfouissement des résidus à l'aide d'un cultivateur léger à dents (travail sur 15 cm de profondeur)• Pas d'usage d'herbicides
	Semis d'un mélange trèfle/luzerne
13 juillet 2016	Première récolte trèfle/luzerne
28 septembre 2016	Deuxième récolte trèfle/luzerne
14 novembre 2016	<ul style="list-style-type: none">• Enfouissement de la culture de trèfle/luzerne• Travail du sol sur 30 cm de profondeur : passage de charrue et de herse rotative
15 novembre 2016	Semis blé tendre d'hiver de la variété Wiwa
21 juillet 2017	Récolte du blé

Tableau 5 Conduite des microparcelles remises en culture suite à la destruction du *Miscanthus*

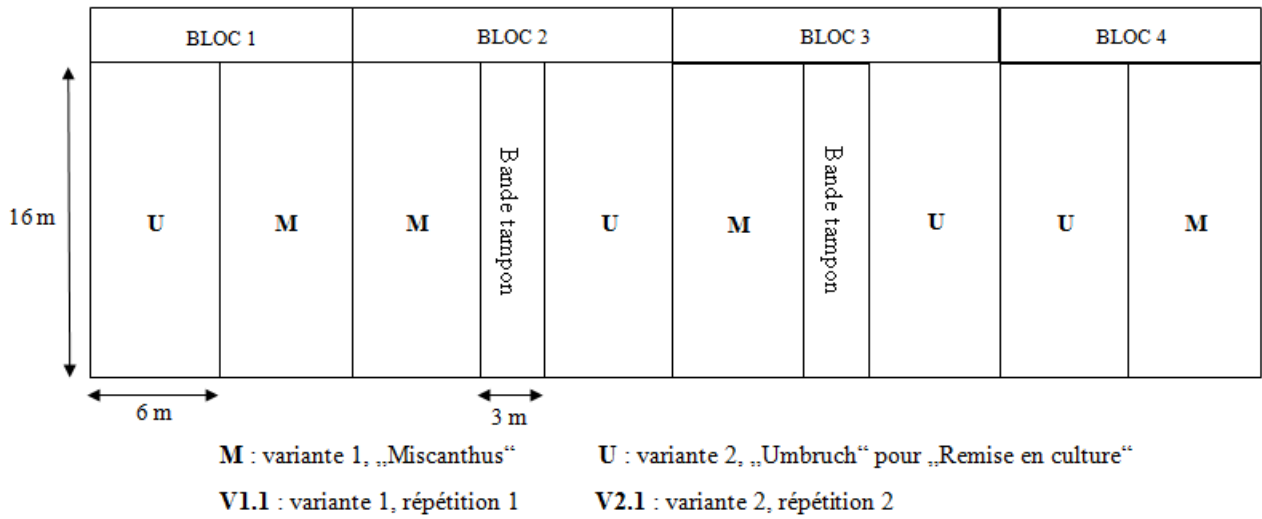


Figure 9 Plan du dispositif expérimental

Suite à la destruction du *Miscanthus*, un passage de cultivateur léger (15 cm de profondeur de travail) a été effectué afin d'amener les rhizomes en surface pour favoriser leur dessèchement et donc leur mort. De plus, il a été fait le choix d'implanter un mélange de trèfle luzerne car c'est une culture facile à conduire en agriculture biologique mais également car les coupes effectuées permettent de détruire les repousses du *Miscanthus*.

La variété de blé Wiwa en place lors de la campagne 2016/2017 est la variété la plus répandue en agriculture biologique en Suisse. C'est une variété tardive qui présente une productivité faible mais orientée pour la production de protéines (Getreidezüchtung Peter Kunz, 2016).

Le *Miscanthus* toujours en place sur les 4 autres microparcelles a été récolté en sec en mars 2016 et en mars 2017.

En ce qui concerne la parcelle de comparaison, celle-ci est conduite depuis plus de 15 ans en système grandes cultures en agriculture biologique. La rotation de cultures type pour cette parcelle est la suivante : 3 céréales d'hiver (blé, seigle, triticale, orge) – 1 légumineuse (féverole, soja) ou trèfle. En 15 ans, il n'y a jamais eu de plante de type C4 (comme le maïs, très présent dans la région), et aucun précédent *Miscanthus*. Pour cette campagne 2016/2017, la parcelle est conduite en pois d'hiver.

1.2.2. Plan du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, représenté par la figure 9, est constitué de 8 microparcelles de 96 m² chacune et réparties en 4 blocs. Chaque bloc compte 2 parcelles correspondant aux deux variantes étudiées : *Miscanthus* (M) et remise en culture (U pour « Umbruch »). Ainsi cet essai se caractérise par un facteur étudié (culture en place) avec deux variantes (V1 pour le *Miscanthus* et V2 pour la remise en culture), 4 répétitions soit 8 traitements, avec aucun gradient d'hétérogénéité.

Année	2016/2017	2017/2018	2018/2019	Année N
Parcelle de comparaison	Pois d'hiver	Culture A	Culture B	Culture N
Parcelles d'essais	Blé tendre d'hiver	Culture A	Culture B	Culture N

Tableau 6 Structure de la succession culturale appliquée au dispositif expérimental

BLOC 1

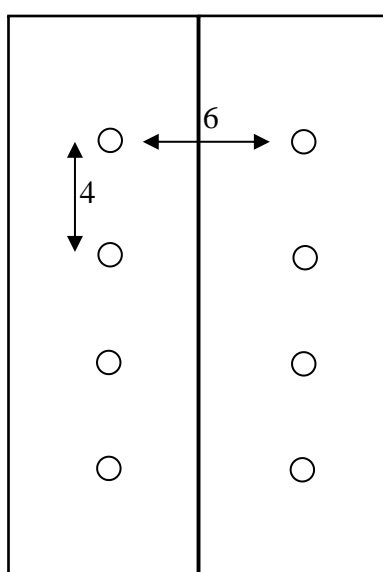


Figure 10 Représentation des zones de prélèvement par bloc



Figure 11 Echantillonnage du sol suite à la récolte hivernale du Miscanthus (photographie personnelle)



Figure 12 Echantillonnage du sol suite à la récolte hivernale du Miscanthus (photographie personnelle)

2. Matériels et méthodes

2.1. Principe de la méthodologie mise en place

Tout d'abord le protocole expérimental présenté à la suite s'applique à une succession de cultures représentative de la région et similaire à celle de la parcelle voisine de comparaison. Ainsi, il sera possible de réaliser un suivi et des comparaisons des différents paramètres mesurés et étudiés sur plusieurs années.

Le tableau 6 représente la structure de la succession culturale sur laquelle s'applique le protocole de suivi pluriannuel.

2.2. Echantillonnages et analyses du sol

2.2.1. Méthodes d'échantillonnage

Plusieurs prélèvements, répondant à différents objectifs avec des protocoles différents, sont faits chaque année sur l'ensemble des parcelles.

Chaque année, quatre échantillons de sol sont récoltés après la récolte hivernale du *Miscanthus* (entre février et avril) pour chacune des 8 microparcelles (cf. figure 10). Les 60 premiers centimètres de sols sont prélevés grâce à un cylindre en plexiglas. Ce cylindre de 65 cm de long et 5,5 cm de diamètre est introduit dans le sol par la pression exercée par un tracteur (cf. figure 11 et 12). Les échantillons sont ensuite découpés tous les 5 cm (soit 12 sections) et séchés pour être analysés. Cela correspond donc à 384 échantillons de sol prélevés chaque année suite à la récolte hivernale du *Miscanthus*. Pour l'année 2015, les 8 microparcelles, soit les deux variantes, étaient encore en *Miscanthus* puisque la destruction du *Miscanthus* a été effectuée en août 2015.

Des prélèvements de sols, destinés à la mesure de la quantité d'azote minéral (N_{min}) dans le sol, sont réalisés mensuellement par le LTZ pour l'ensemble des parcelles depuis la destruction du *Miscanthus* en août 2015 pour la variante U et depuis avril 2016 pour la variante M. Ces prélèvements sont faits à trois profondeurs : 0 à 30 cm, 30 à 60 cm et 60 à 90 cm. Pour chaque microparcelle, 2 échantillons de sol sont prélevés. En ce qui concerne les microparcelles de la variante U, les 2 échantillons de chaque traitement sont mélangés puis la quantité de N_{min} pour chaque traitement de U est déterminée. Pour la variante M, les 8 échantillons prélevés sont mélangés, ainsi la quantité moyenne de N_{min} est déterminée. Ces prélèvements n'ont pas été réalisés en mai et juin 2017 du fait que le blé était en pleine croissance et utilisait l'azote minéral du sol. Suite à la récolte du blé, les prélèvements sont à nouveau effectués chaque mois.

Enfin des prélèvements de sols destinés à des analyses de sol plus générales ont été réalisés entre 1999 et 2016 (9 analyses de sol) sous *Miscanthus* puis suite à la destruction du *Miscanthus* pour les microparcelles remises en cultures.

2.2.2. Analyses des échantillons de sol

2.2.2.1. Densité apparente du sol

La densité apparente (D_a) ou masse volumique du sol est déterminée par la méthode gravimétrique après séchage des échantillons à 105°C. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$D_a = \frac{MSt}{\pi * r^2 * h} \text{ [g.cm}^{-3}\text{]} \text{ avec}$$

MSt : Matière sèche totale de l'échantillon
 r : radian (2,75 cm)

Elle a été mesurée pour les échantillons prélevés après la récolte hivernale du Miscanthus donc pour les deux variantes, pour les 12 profondeurs de sol et pour chaque année.

2.2.2.2. Suivi de l'évolution de l'azote

- **Mesure du N total**

La quantité d'azote totale (N_t) est déterminée pour tous les échantillons prélevés annuellement après la récolte hivernale du Miscanthus. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un analyseur élémentaire CN de type VarioMax. Grâce à la densité apparente, les quantités de N_t peuvent être exprimées en kg.ha^{-1} et ainsi comparées entre elles.

- **Suivi de la minéralisation de l'azote**

Le suivi de minéralisation de l'azote du sol, par la quantification de ses produits de dégradation, permet d'avoir une estimation du potentiel de fourniture d'azote du sol.

La minéralisation de l'azote est mesurée périodiquement en conditions contrôlées par des incubations de sol à 20°C, ce qui permet d'accélérer ce phénomène biologique lent. Elle est mesurée pour chaque traitement et pour 5 profondeurs (de 0 à 25 cm) et pour les 3 années de l'expérimentation. Chacun des échantillons de sol (20 g) est issu du mélange des 4 prélèvements effectués pour un traitement, une profondeur et une année donnée. Les prélèvements sont réalisés après la récolte du Miscanthus en hiver. 8 g d'eau distillés sont ensuite ajoutés afin d'obtenir une humidité correspondante à 70 % de la capacité de rétention d'eau maximale du sol, puis l'ensemble est pesé et mis à incuber à 20°C. Les extractions d'azote minéral sont réalisées périodiquement pendant 6 semaines. Chaque échantillon est pesé après incubation puis agité pendant 1 heure dans 40 ml de solution de CaCl_2 à 0,125 M, puis est ensuite filtré. Les ions ammoniums et nitrates sont dosés dans le filtrat par colorimétrie en flux continu. On obtient ainsi N_{min} , soit la quantité d'azote minéral dans chaque échantillon. La quantité d'azote minéral est ensuite déterminée en kg.ha^{-1} grâce à la densité apparente du sol. Ainsi, pour résumer cette expérimentation 615 échantillons de sols sont analysés :

[5 Extractions (0 j, 7 j, 14 j, 28 j, 35 j) x 4 répétitions (blocs 1, 2, 3, 4)
x 2 variantes (Miscanthus / Umbruch) x 5 profondeurs (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 cm)
x 3 années (2015, 2016, 2017)] + témoins (5 x 3 années)

- **Mesure du N minéral**

Les mesures d'azote minéral sont réalisées sur les échantillons de sol prélevés à cet effet et pour les trois profondeurs 0-30, 30-60 et 60-90 cm. L'azote minéral est mesuré par une méthode identique à celle présentée précédemment mais sans période d'incubation. Ces mesures nous permettent de suivre son évolution quantitative dans le sol, plus particulièrement de déterminer le reliquat azoté au semis et post-récolte. Cela est nécessaire pour la réalisation d'un bilan azoté.

2.2.2.3. *Suivi de l'évolution du carbone*

La quantité de carbone totale (Ct) est mesurée par un analyseur élémentaire CN de type VarioMax pour tous les échantillons prélevés annuellement après la récolte hivernale du Miscanthus.

Pour ces mêmes échantillons, 5g sont ensuite séchés pendant une nuit à 105°C et décarbonatés par combustion sèche à 550°C pendant 4 heures. La quantité de carbone inorganique est mesurée à l'aide de l'analyseur élémentaire CN, les carbonates étant labiles à 550°C. Ainsi la teneur en carbone organique est déterminée par la formule :

$$\mathbf{Corg = Ct - C\ inorg}$$

Grâce à la densité apparente, les quantités de Corg peuvent être exprimées en kg.ha⁻¹ et ainsi comparées entre elles.

2.2.2.4. *C/N : un indice de l'évolution de la MO*

Le ratio C/N est un indicateur de l'activité biologique des sols, informant sur le degré d'évolution de la MO et le potentiel de minéralisation de l'azote (Decoopman et al., 2013). Ce ratio est calculé avec Ct et Nt pour les 8 microparcelles, pour les 12 profondeurs et pour chaque année.

2.2.2.5. *P et K*

Les quantités de phosphore (P₂O₅) et de potassium (K₂O) dans le sol n'ont pas fait l'objet d'un suivi spécifique. Néanmoins, les analyses de sol réalisées depuis 1999 nous permettent de déterminer la tendance globale de leur évolution dans le sol.

Les mesures sont réalisées selon la méthode CAL du « Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs - und Forschungsanstalten ». Suite à une extraction dans une solution de calcium acétate lactate, P est dosé par photométrie et K avec un photomètre à flamme.

2.3. Echantillonnage et analyse de la biomasse

2.3.1. Echantillonnage et analyse

Du stade épis 1 cm à la récolte du blé, plusieurs prélèvements de la biomasse aérienne du blé ont été réalisés selon un protocole de l'ITAB (2000). Pour chaque microparcelle, deux échantillons de biomasse sont prélevés. Un prélèvement correspond à une zone d'un mètre linéaire sur 2 rangs contigus. Dans notre cas, l'inter-rang étant de 17 cm, cela correspond à des placettes de 0,34 m². Les échantillons sont ensuite pesés, séchés pendant 48 heures à 80°C, à nouveau pesés et envoyés au laboratoire pour un dosage de l'azote selon la méthode de Dumas. A partir de la fin d'épiaison, les épis sont séparés des pailles pour obtenir les teneurs en azote de chaque organe. Ainsi les épis et les pailles sont pesés et séchés séparément puis l'azote est dosé indépendamment par la méthode de Dumas.

La parcelle de comparaison associée au dispositif étant conduite en pois d'hiver cette année, elle n'a pas pu être utilisée comme comparaison. Des mesures ont donc été faites sur une autre parcelle de blé Wiwa conduite également en agriculture biologique et sans fertilisation. Néanmoins cette parcelle offre un potentiel de production moindre. C'est en effet une parcelle avec un sol limono-sableux, présentant une pierrosité importante et ayant un indice de qualité de 61 soit inférieur à la parcelle Wasserloch. Pour les campagnes suivantes, les mesures seront réalisées sur la parcelle de comparaison associée.

2.3.2. Analyse de l'état de nutrition azotée de la culture

La satisfaction des besoins nutritifs du blé, plus particulièrement en azote, est déterminée à l'aide de la méthode de la courbe de dilution critique en azote et par le calcul de l'Indice de Nutrition Azotée (INN) (Justes et al., 1994). Cette méthode, permettant le calcul de l'INN, met en relation la mesure de la biomasse aérienne et le dosage de l'azote des parties aériennes.

$$\text{INN} = \%N \text{ observé parties aériennes} / \%N \text{ critique}$$

La teneur en azote critique correspond à la concentration minimale en azote pour une production maximale de matière sèche à une date donnée (Justes et al., 1994). Cette concentration %N critique est déterminée par la courbe critique de l'azote spécifique du blé tendre de Justes et al. (1994) ayant pour équation : $\%N \text{ critique} = 5.35 \text{ MS}^{-0.442}$ pour un blé présentant une production de biomasse supérieure ou égale à 1,55 t.ha⁻¹.

Un $\text{INN} \geq 1$ signifie que l'azote n'est pas limitant pour la croissance de la culture, un $\text{INN} < 1$ met en évidence une carence azotée de la culture. Plus l'INN est faible plus la carence est importante (Recous et al., 2011):

- $0,8 < \text{INN} < 1$: carence faible, apport en N satisfaisant
- $0,6 < \text{INN} < 0,8$: carence limitant le rendement de manière significative
- $\text{INN} < 0,6$: carence très limitante pour la culture

A partir de la concentration en azote de la biomasse aérienne, il est possible de déterminer la quantité d'azote totale absorbée par la plante entière (ITAB, 2000) :

$$\text{N absorbé total} = \text{N absorbé} \times 1,25$$

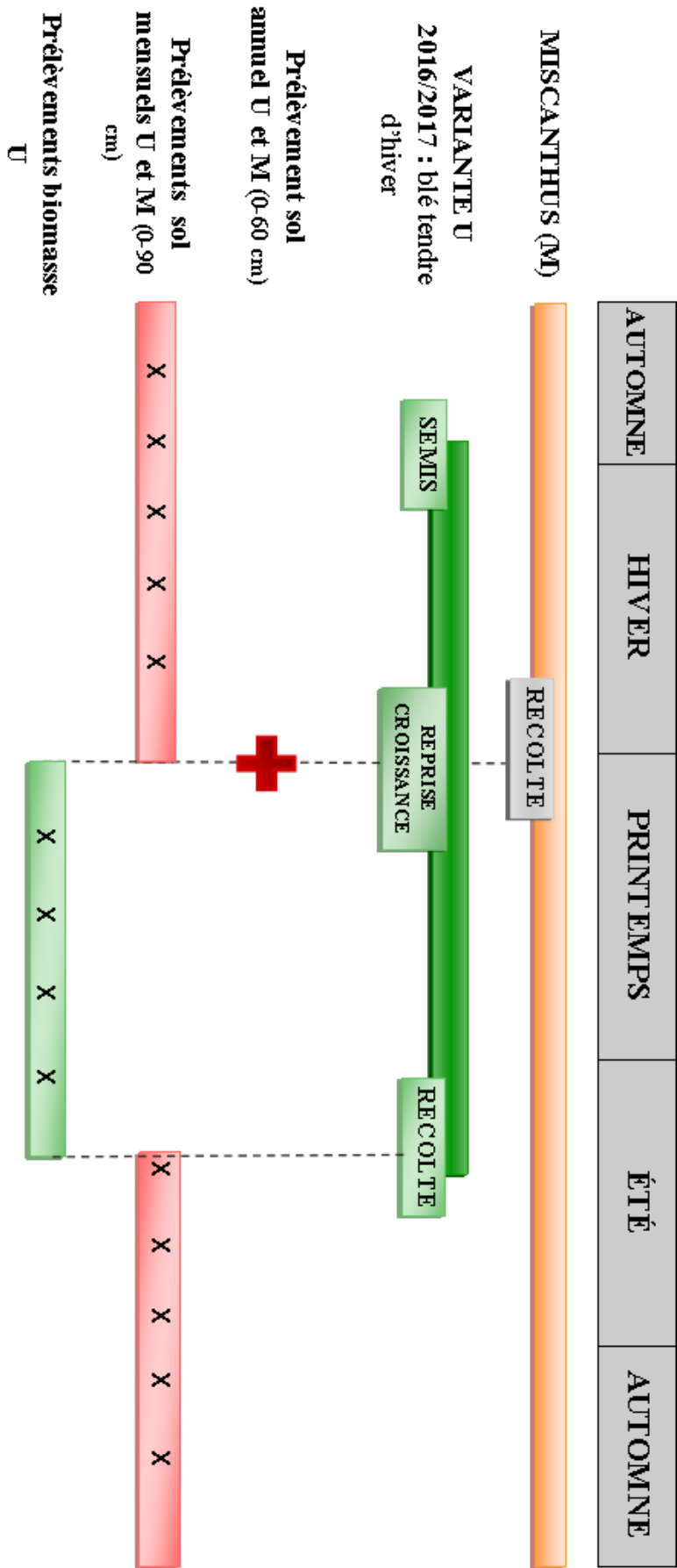


Figure 13 Schéma présentant le protocole annuel, exemple pour l'année en cours (2016/2017)

2.4. Estimation des rendements

Suite à la récolte du blé au 21 juillet 2017, les rendements ont été mesurés pour chaque répétition sur une surface de 25 m².

2.5. Risque de pertes du système

L'objectif est de mettre en évidence un potentiel risque de lixiviation des nitrates dans le système. Pour cela, une analyse graphique de l'évolution de la teneur en azote minéral du sol sur 90 cm est réalisée en lien avec la pluviométrie (station météorologique du LTZ à Müllheim) pour les microparcelles remises en culture mais également pour une microparcelle de Miscanthus.

2.6. Bilan azote : minéralisation nette de l'azote

La réalisation d'un bilan azoté, sur la période correspondant du semis à la récolte du blé, nous permet de calculer la minéralisation nette de l'azote pour le cycle de production du blé. Il est calculé selon la formule suivante :

Minéralisation nette N (semis à la récolte du blé) = Azote absorbé + Pertes + Reliquat post-récolte – Nmin sol au semis

2.7. Traitement des données

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SigmaPlot (version 12.0). Les tests de normalité et les analyses de variance permettent la mise en évidence d'effets facteur (variante M ou U, année, profondeur) sur la variable étudiée. Lorsque des effets et des différences significatifs sont détectés, une analyse multiple de comparaison est réalisée par la méthode de Newman-Keuls. Concernant l'essai minéralisation, tous les tests statistiques ont été réalisés pour les résultats obtenus au jour 35 d'incubation.

Pour finir, le schéma ci-contre (cf. figure 13) résume ce protocole expérimental en prenant pour exemple l'année en cours, c'est-à-dire avec les parcelles de la variante remise en culture en blé d'hiver. Le protocole sera à adapter chaque année en fonction de la culture en place.

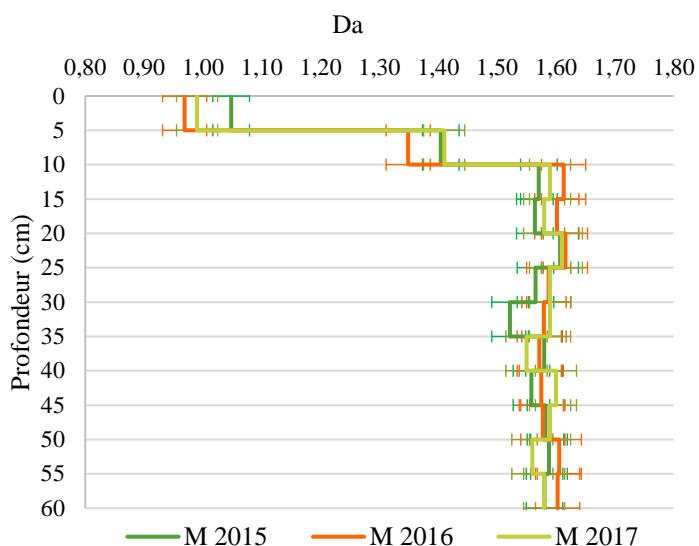


Figure 14 Evolution moyenne de la densité apparente pour la variante M en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017)

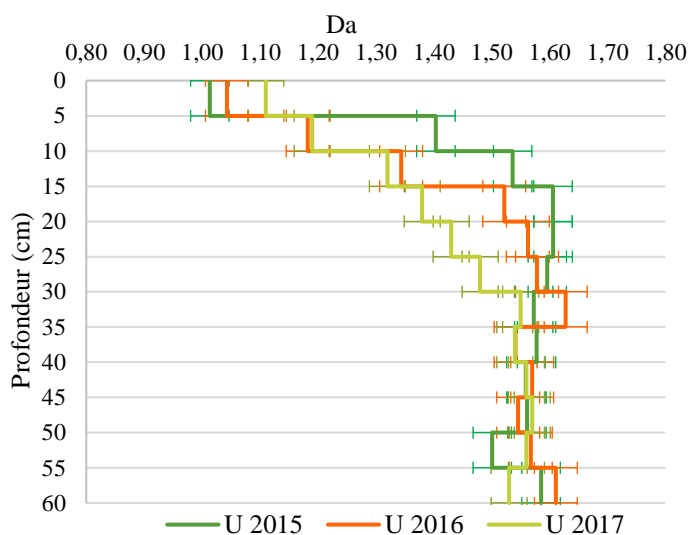


Figure 15 Evolution moyenne de la densité apparente pour la variante U en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017)

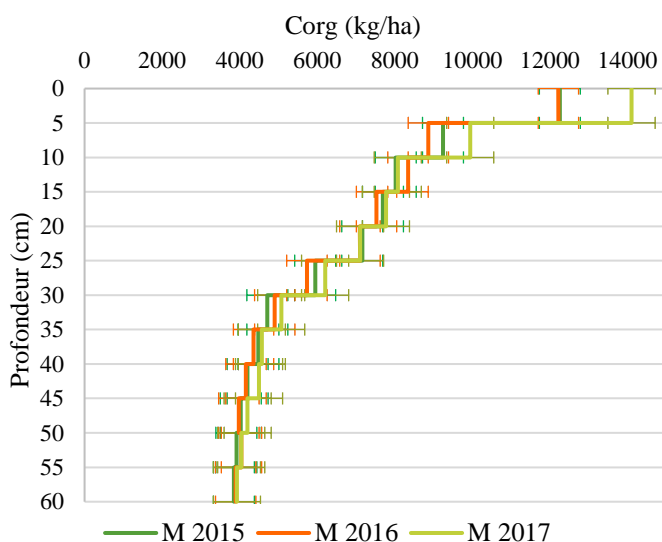


Figure 16 Evolution moyenne de la quantité de Corg pour la variante M en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017)

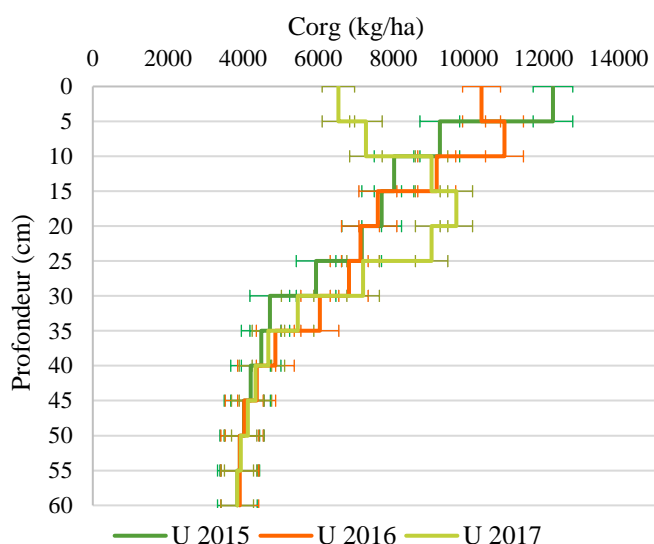


Figure 17 Evolution moyenne de la quantité de Corg pour la variante U en fonction de la profondeur (Hanneman, 2016; Idler, 2017)

	2015	2016	2017
M	75531	75147	79530
U	75531	79179	74376
U/M $\Delta\text{Corg kg.ha}^{-1}$	0	+4032	-5154
U/M $\Delta\text{Corg \%}$	0,00	+5,37	-6,48

Tableau 7 Corg moyen total de 0 à 60 cm de profondeur pour les variantes M et U et comparaison entre variantes (Hanneman, 2016; Idler, 2017)

	2015-2016	2016-2017	2015-2017
M $\Delta\text{Corg kg.ha}^{-1}$	-384	+ 383	+3999
M $\Delta\text{Corg \%}$	-0,51	+5,83	+5,29
U $\Delta\text{Corg kg.ha}^{-1}$	+3648	-4803	-1155
U $\Delta\text{Corg \%}$	+4,83	-6,07	-1,53

Tableau 8 Evolution du Corg moyen total de 0 à 60 cm de profondeur pour les deux variantes M et U (Hanneman, 2016; Idler, 2017)

III. RESULTATS

1. Evolution quantitative et qualitative de la MOS et de sa dégradation

1.1. Densité apparente (Da)

1.1.1. Variante Miscanthus (M)

L'évolution de la densité apparente pour la variante M entre 2015 et 2017 est présentée par la figure 14. La densité apparente suit la même tendance pour les trois années. Elle augmente avec la profondeur : pour les 5 premiers centimètres de sol elle est en moyenne sur les 3 années de 1 g.cm^{-3} , puis augmente à $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ pour la profondeur de 0 à 5 cm et enfin à $1,52 \text{ g.cm}^{-3}$ en moyenne à partir de 10 cm de profondeur.

1.1.2. Variante Remise en culture (U)

L'évolution de la densité apparente pour la variante U entre 2015 et 2017 est présentée par la figure 15. Pour les 15 premiers centimètres de sol on constate une diminution de la Da entre 2015 et 2016, soit à la suite d'un premier travail du sol superficiel (15 cm) en août 2015. La même observation est également faite de 15 cm à 30 cm de profondeur avec une diminution de la Da entre 2015 et 2017, donc à la suite au travail du sol réalisé sur les trente premiers centimètres du sol en novembre 2016. A partir de 30 cm de profondeur, la Da est semblable pour les 3 années et se stabilise à une valeur moyenne de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$. Ainsi suite aux différents travaux du sol, la densité apparente du sol diminue pour les horizons concernés avec une augmentation de la porosité du sol et donc de son aération.

1.1.3. Comparaison des deux variantes

Deux ans après la destruction du Miscanthus, on observe une diminution de la Da pour la variante U par rapport à la variante M sur la profondeur de sol travaillée (0 à 30 cm). Cette différence est significative ($p=0,008$) (cf. annexe 2). Au-delà de l'horizon travaillé, la Da est semblable pour les deux variantes, aux alentours de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$.

1.2. Carbone organique

1.2.1. Variante M

Comme le montre la figure 16, on observe une augmentation de la quantité de Corg de 2000 kg.ha^{-1} entre 2015 et 2017 sur les 5 premiers centimètres de sol et de 1000 kg de 5 à 10 cm, ce qui traduit une accumulation de Corg et donc de MO en surface. A partir de 10 cm, la teneur en Corg suit la même tendance pour les 3 années. En ce qui concerne la quantité de Corg totale, il y a une augmentation de 5,29 % soit 3999 kg.ha^{-1} en 2017 par rapport à 2015 (cf. tableau 8).

Tableau 9 Nt moyen cumulé de 0 à 60 cm de profondeur pour les variantes M et U et comparaison entre variantes

	2015 (kg.ha ⁻¹)	2016 (kg.ha ⁻¹)	ΔNt kg.ha ⁻¹	ΔNt %
M	8376,4	8372,4	-4,00	-0,05%
U	8416,9	8715,8	+298,9	+3,55%
U/M 2016			+343,4	+4,1 %

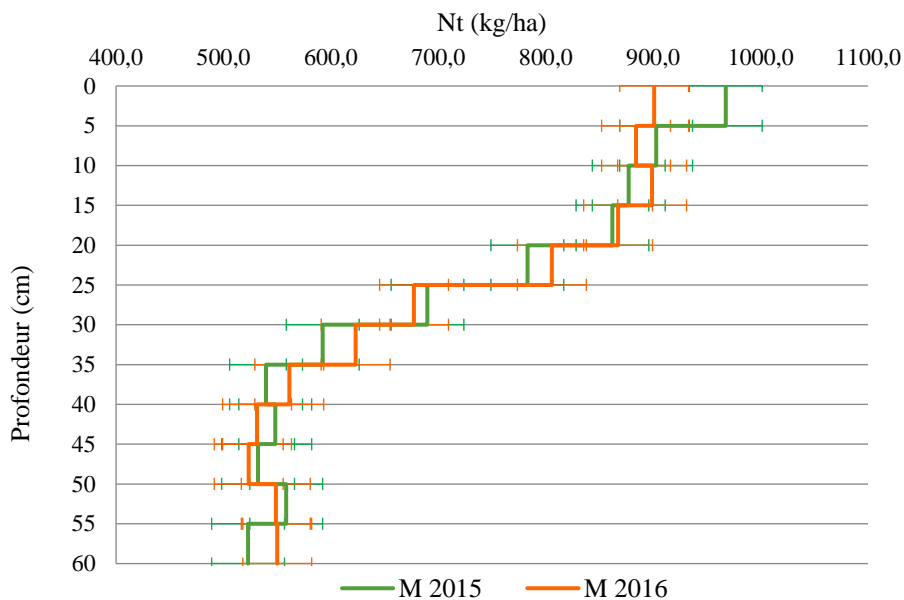


Figure 18 Evolution moyenne de la quantité de Nt pour la variante M en fonction de la profondeur

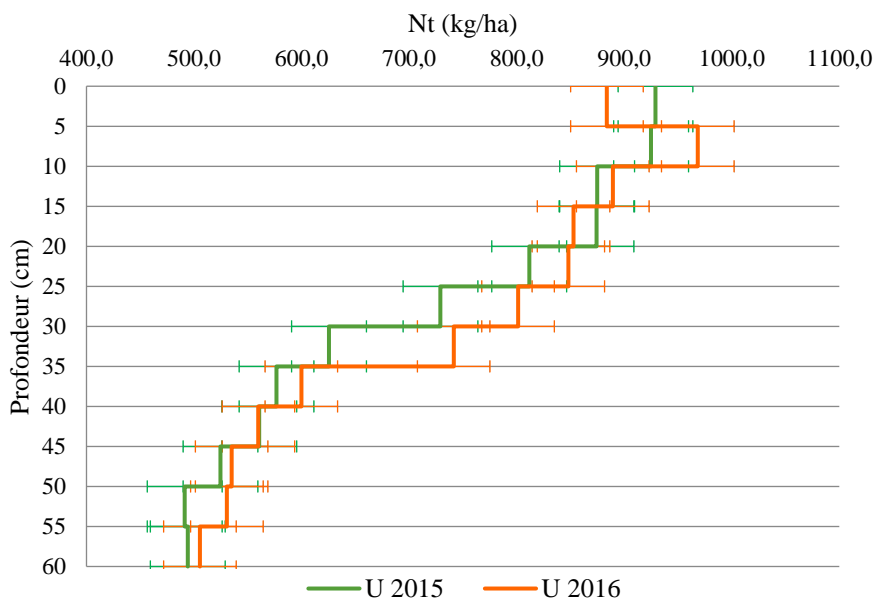


Figure 19 Evolution moyenne de la quantité de Nt pour la variante U en fonction de la profondeur

1.2.2. Variante U

La figure 17 met en évidence une augmentation de la teneur en Corg de 5 à 15 cm de profondeur et une diminution de 0 à 5 cm entre 2015 et 2016 soit après le travail du sol en août 2015 sur 15 cm de profondeur. En 2017, suite au travail du sol sur 30 cm en novembre 2016, il y a eu à nouveau une redistribution du Corg sur les différentes profondeurs avec une diminution sur les 10 premiers centimètres et une augmentation de 10 à 25 cm par rapport aux années précédentes.

Au-delà de 30 cm de profondeur, donc de la profondeur de sol travaillée, il n'y a pas de différence d'évolution de la quantité du Corg entre les trois années. Bien qu'il y ait eu une augmentation de la quantité totale de Corg entre 2015 et 2016 de 4,83 % (cf. tableau 8), elle a diminué en 2017 de 4803 kg.ha⁻¹ par rapport à 2016 et de 1155 kg.ha⁻¹, soit de 1,53 %, par rapport à 2015, donc avant la destruction du Miscanthus.

1.2.3. Comparaison des deux variantes

Pour les deux variantes, on observe une plus forte teneur en Corg dans les premiers centimètres de sol. La tendance est à la diminution de la quantité de Corg avec l'augmentation de la profondeur. L'année suivante la destruction du Miscanthus, en 2016, la quantité de Corg totale était supérieure de 5,37 % soit 4032 kg.ha⁻¹ pour U par rapport à M. Néanmoins en 2017, on observe une perte de Corg de 6,48 %, soit 5154 kg.ha⁻¹ entre U et M (cf. tableau 7).

1.3. N total

Du fait de problèmes techniques lors du dosage de l'azote dans les échantillons, les valeurs de d'azote total ne sont pas disponibles pour l'année 2017. Les tests et résultats statistiques sont présentés par l'annexe 3.

1.3.1. Variante M

La quantité de Nt suit la même tendance en 2015 et en 2016 pour les différentes profondeurs de sol avec une diminution de la teneur corrélée à la profondeur (cf. figure 18). Il n'y a également pas de différence significative entre la quantité totale de N ($p=0,796$) avec 8304 kgN.ha⁻¹ en 2015 et 8349 kgN.ha⁻¹ en 2016 ce qui représente une diminution de 0,05 % (cf. tableau 9).

1.3.2. Variante U

D'après la figure 19, et comme pour la variante M, la quantité de Nt a tendance à diminuer avec la profondeur en 2015 et 2016. Néanmoins quelques différences sont observées. Il y a une augmentation de la teneur en Nt pour la profondeur 5-10 cm en 2016 par rapport à 2015 et une diminution pour les cinq premiers centimètres du fait du travail du sol en surface d'août 2015. Il y a également une augmentation de la quantité de N de 20 à 35 cm entre 2015 et 2016. Bien que la concentration totale soit plus élevée en 2016 avec 8732 kg.ha⁻¹ par rapport à 2015 avec 8417 kg.ha⁻¹ (cf. tableau 9), il n'y a pas de différence significative entre les deux années ($p=0,132$).

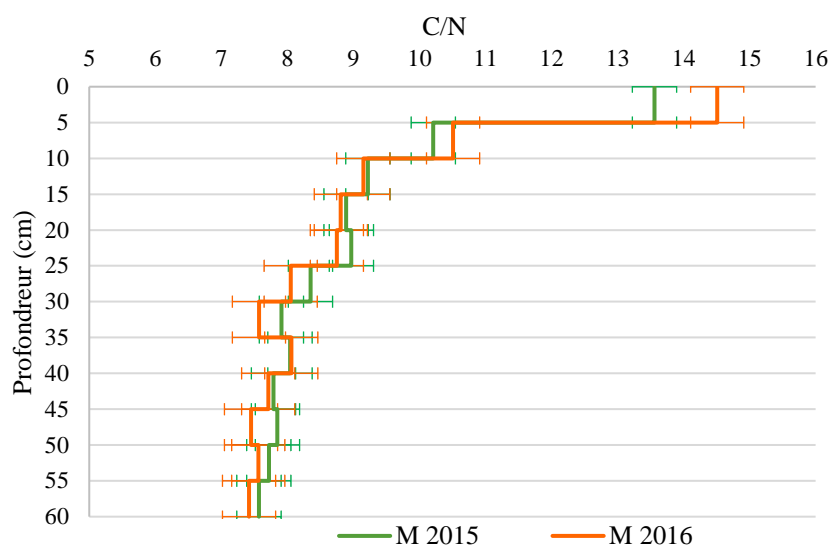


Figure 20 Evolution moyenne du C/N pour la variante M en fonction de la profondeur

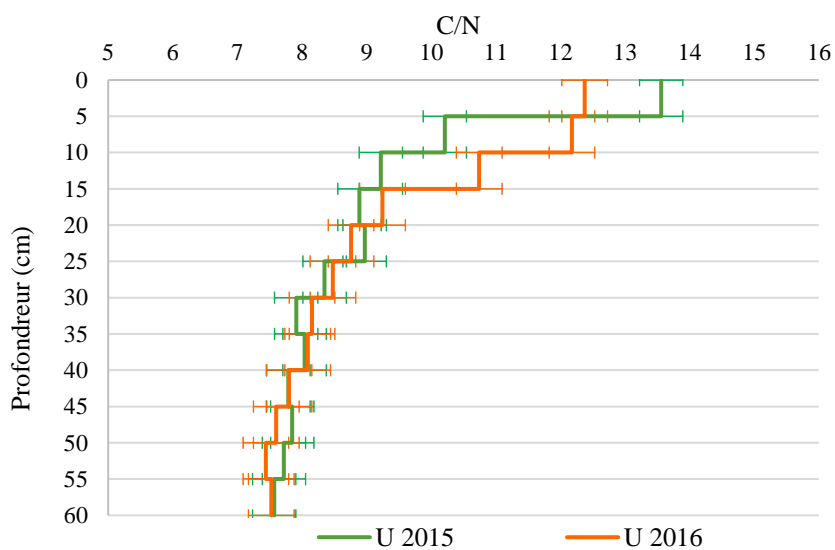


Figure 21 Evolution moyenne du C/N pour la variante U en fonction de la profondeur

1.3.3. Comparaison des deux variantes

L'année suivant la destruction du Miscanthus, en 2016, la quantité de N est supérieure de 343,4 kg.ha⁻¹ pour U par rapport à M (cf. tableau 9), cependant cette différence n'est pas significative (p=0,052). Cela s'explique par le fait que l'on observe des différences significatives pour les profondeurs 5-10 cm (p=0,004), 25-30 cm (p=0,027) et 30-35 cm (p=0,029) avec une quantité en Nt plus élevée pour U que pour M.

1.4. C/N

Les valeurs C/N pour l'année 2017 sont également indisponibles du fait de l'absence des valeurs pour Nt.

1.4.1. Variante M

Le C/N, qui diminue en profondeur, est similaire entre 2015 et 2016 pour les différentes profondeurs (cf. figure 20). Il est de 14 pour les 5 premiers centimètres ce qui témoigne d'un sol à décomposition lente de la MO provoquant une immobilisation de l'azote par les microorganismes. Il est de 10 pour 5 à 10 cm de profondeur ce qui correspond à une bonne décomposition de la MO. Enfin, il est en moyenne de 8 à partir de 10 cm de profondeur correspondant à un sol à décomposition rapide de la MO.

1.4.2. Variante U

D'après la figure 21, on observe pour l'année 2016 une augmentation du C/N par rapport à 2015 de 5 à 15 cm de profondeur, soit sur la profondeur de sol travaillé lors de la destruction du Miscanthus. Pour cet horizon en 2016, le C/N passe de 12, correspondant à un sol avec une activité biologique réduite, à 9 ce qui montre une bonne activité biologique du sol et une bonne dégradation de la MO. A partir de 20 cm de profondeur, il évolue de manière similaire pour 2015 et 2016 et est en moyenne de 8 ce qui témoigne d'un sol à forte activité biologique avec une dégradation rapide de la MO.

1.4.3. Comparaison des deux variantes

Suite à la destruction du Miscanthus, soit en 2016, on observe un C/N plus élevé pour U pour les 15 premiers centimètres de sol. A partir de 15 cm, soit au-delà de l'horizon travaillé, le C/N est similaire pour les deux variantes.

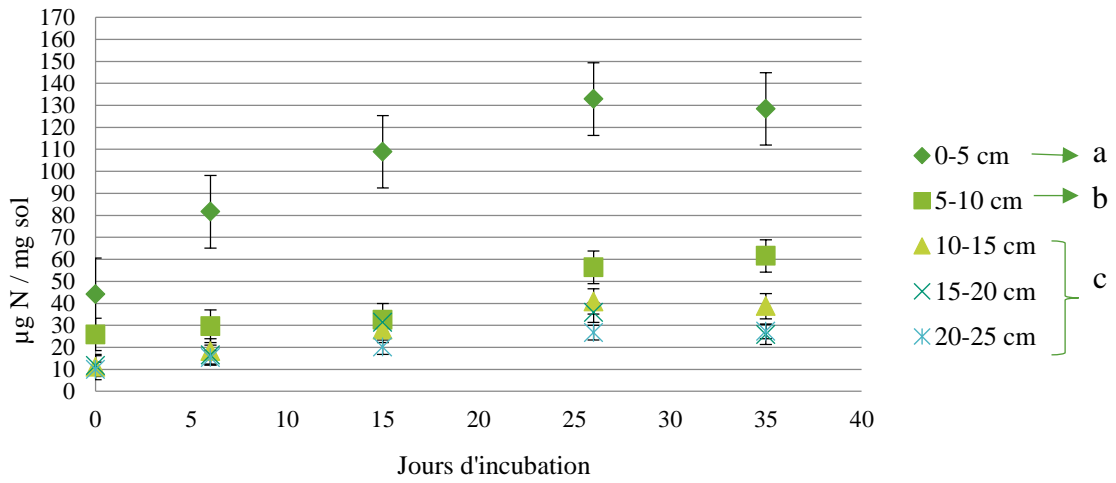


Figure 22 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante M pour l'année 2015 (moyenne des 4 répétitions) ($p < 0,001$)

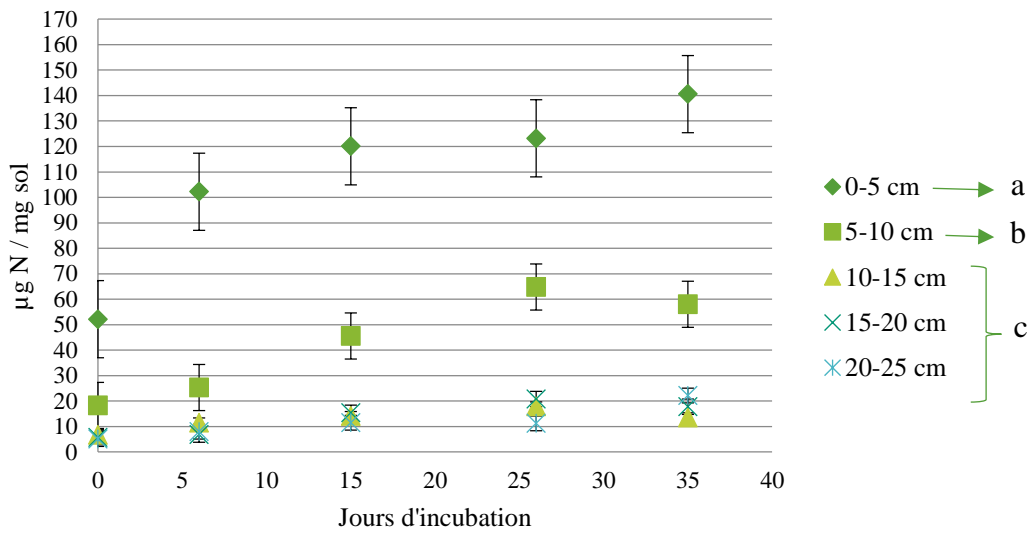


Figure 23 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante M pour l'année 2016 (moyenne des 4 répétitions) ($p < 0,001$)

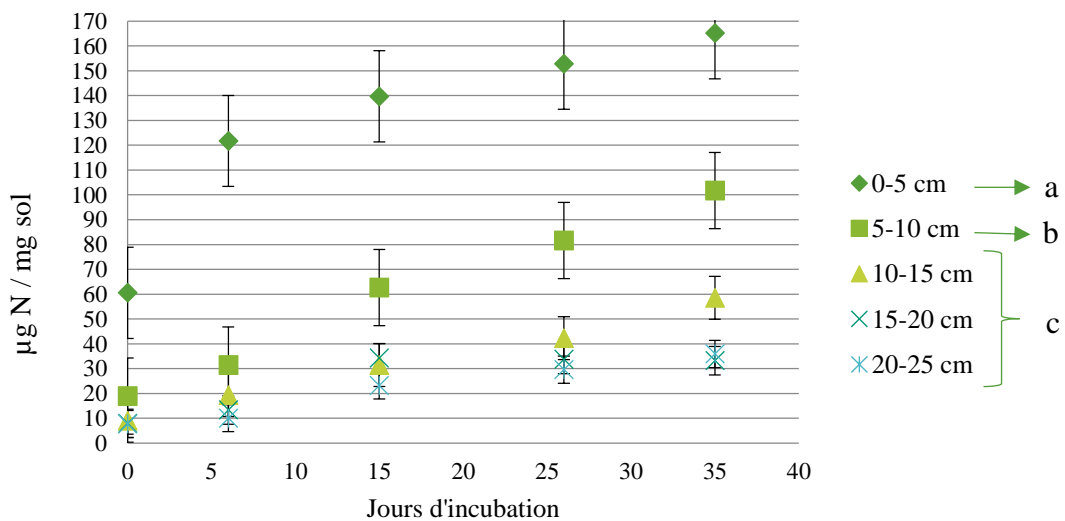


Figure 24 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante M pour l'année 2017 (moyenne des 4 répétitions) ($p < 0,001$)

1.5. Minéralisation de l'azote

L'ensemble des résultats sont présents dans l'annexe 4, les graphiques sont réalisés avec les moyennes de chaque variante calculées à l'aide des 4 répétitions. L'ensemble des résultats statistiques présentés par la suite sont issus de tests réalisés pour les résultats du jour 35 d'incubation. Ces tests et résultats statistiques sont présentés par l'annexe 5.

Le tableau 10 ci-dessous présente les groupes issus des différences significatives par le test de Newman-Keuls entre les profondeurs pour les 3 années 2015, 2016 et 2017 ($p < 0,001$).

	M			U		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
0-5 cm	a	a	a	a	a	a
5-10 cm	b	b	b	b	a	a
10-15 cm	c	c	c	b	a	a
15-20 cm	c	c	c	b	b	a
20-25 cm	c	c	c	c	b	a

Tableau 10 Différences significatives issues du test Newmann-Keuls de la minéralisation de N entre les différentes profondeurs pour chaque année au jour 35 d'incubation

Le tableau 11 ci-dessous présente les groupes issus des différences significatives entre années pour chaque profondeur.

	M					U				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
2015	a	a	ab	a	a	a	a	a	a	b
2016	a	a	b	a	a	a	a	a	a	b
2017	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a

Tableau 11 Différences significatives issues du test Newmann-Keuls de la minéralisation de N entre années pour chaque profondeur (en cm) au jour 35 d'incubation

Pour ces deux tableaux, les lettres représentent les différents groupes dont la hiérarchisation est la suivante :

Minéralisation N groupe a > Minéralisation N groupe b > Minéralisation N groupe c

1.5.1. Variante M

- **Analyse globale**

On observe une minéralisation positive de l'azote suivant la même évolution pour les trois années et pour toutes les profondeurs étudiées, d'où un potentiel de minéralisation suivant la même tendance les trois années (cf. figures 22, 23 et 24). Au jour 35 d'incubation et en cumulant l'ensemble des profondeurs $281 \mu \text{Nmin.mg}^{-1}$ de sol sont libérés en 2015, $252,0 \mu \text{Nmin.mg}^{-1}$ de sol en 2016 et $394,5 \mu \text{Nmin.mg}^{-1}$ de sol en 2017.

- **Analyse de la minéralisation pour chaque année**

Bien que la quantité de Nmin libérée soit supérieure en 2017, il n'y a pas de différence significative entre les trois années pour les différentes profondeurs. Une différence significative est uniquement observée pour 10-15 cm ($p < 0,05$) avec une minéralisation de N supérieure pour l'année 2017 (a) par rapport aux années 2015 (ab) et 2016 (b) (cf. tableau 11). Cette différence significative n'était pas attendue du fait que sous Miscanthus il n'y a pas de travail du sol, donc il n'y a pas de redistribution de MO dans les horizons.

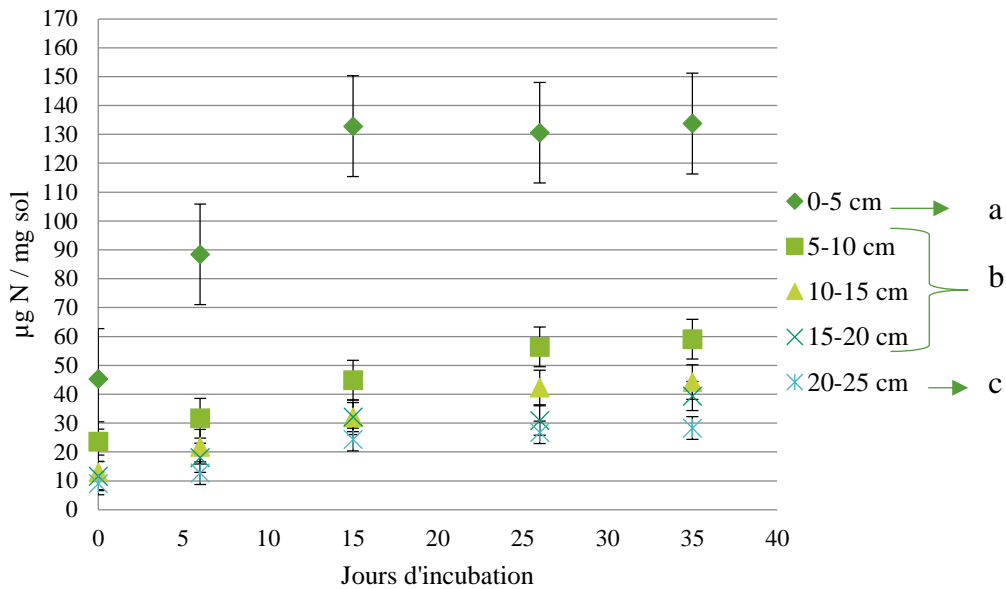


Figure 25 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante U pour l'année 2015 (moyenne des 4 répétitions) ($p < 0,001$)

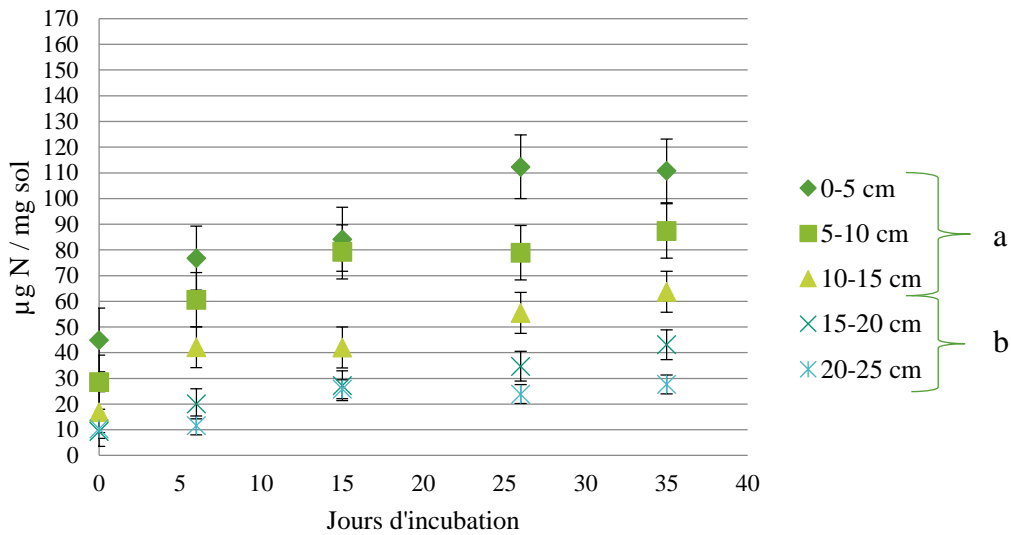


Figure 26 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante U pour l'année 2016 (moyenne des 4 répétitions) ($p < 0,001$)

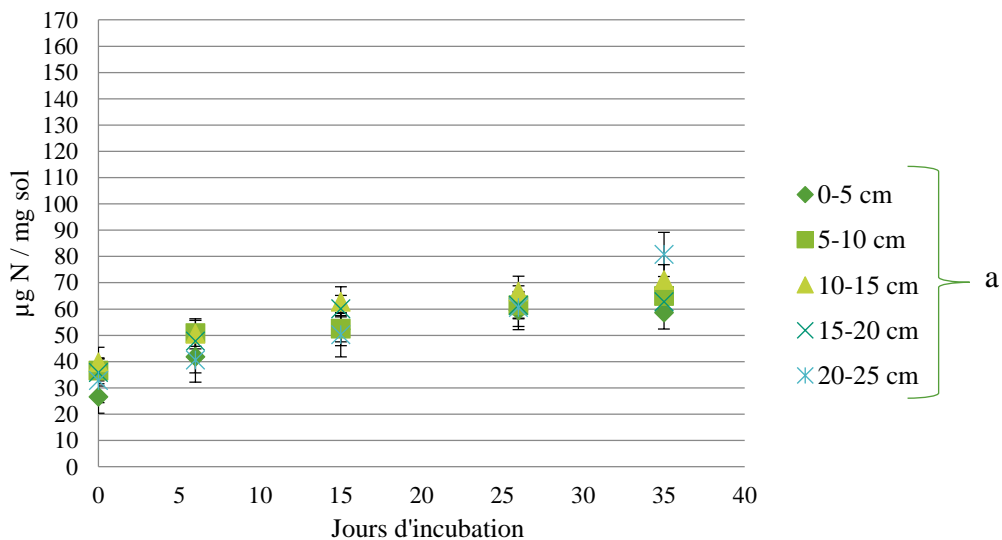


Figure 27 Suivi de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pour la variante U pour l'année 2017 (moyenne des 4 répétitions) ($p < 0,001$)

- **Evolution de la minéralisation pour les différentes profondeurs étudiées :**

Pour l'année 2015, des différences significatives sont mises en évidence entre les différentes profondeurs ($p < 0,001$). Ces mêmes différences sont également observées en 2016 et 2017. La minéralisation est ainsi répartie de la manière suivante sous Miscanthus (cf. tableau 10) :

Minéralisation N 0-5 cm (a) > minéralisation N 5-10 cm (b) > minéralisation N 10-25 cm (c)

1.5.2. Variante U

- **Analyse globale**

On observe une minéralisation positive de l'azote suivant la même évolution pour les trois années et pour toutes les profondeurs étudiées (cf. figures 25, 26 et 27). Au jour 35 d'incubation et en cumulant l'ensemble des profondeurs, $304,8 \mu \text{Nmin.mg}^{-1}$ de sol sont libérés en 2015, $332,7 \mu \text{Nmin.mg}^{-1}$ de sol en 2016 et $338,0 \mu \text{Nmin.mg}^{-1}$ de sol en 2017. Aucune différence significative n'est observée entre 2015 et 2017 ($p = 0,407$) ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence de minéralisation, entre avant la destruction du Miscanthus et la deuxième année suivant la destruction.

- **Analyse de la minéralisation pour chaque année**

Avant la destruction du Miscanthus en 2015, des différences significatives sont observées entre les différentes profondeurs ($p < 0,001$) avec une minéralisation de N suivant la hiérarchisation suivante (cf. tableau 10) :

Minéralisation N 0-5 cm (a) > minéralisation N 5-20 cm (b) > minéralisation N 20-25 cm (c)

Pour l'année 2016, soit après un travail du sol sur 15 cm, on observe deux groupes avec des différences significatives ($p < 0,001$) (cf. tableau 10) :

Minéralisation N 0-15 cm (a) > minéralisation N 5-25 cm (b)

Pour l'année 2017 aucune différence significative n'est observée entre les profondeurs ($p > 0,05$) du fait d'un travail du sol sur 30 cm en novembre 2016 qui a distribué la MO sur l'ensemble de l'horizon travaillé : **minéralisation N 0-25 cm (a)** (cf. tableau 10).

- **Evolution de la minéralisation pour les différentes profondeurs étudiées :**

Pour la profondeur 0-5 cm, deux groupes ont été mis en évidence (cf. tableau 10) :

Minéralisation N 2015, 2016 (a) > minéralisation N 2017 (b)

Cela s'explique par une diminution des apports de MO au sol suite à la destruction du Miscanthus, mais également au travail du sol (août 2015 et novembre 2016) qui a redistribué la MO en profondeur.

De 5 à 15 cm de profondeur, une tendance émerge bien qu'il n'y ait pas de différence significative ($p = 0,053$ pour 5-10 cm et $p = 0,205$ pour 10-15 cm) :

Minéralisation N 2016 > minéralisation N 2017 > minéralisation N 2015

Cela s'explique par un travail du sol sur 15 cm en août 2015.

De 15 à 20 cm, il n'y a pas de différence significative entre les années ($p=0,269$), néanmoins une tendance se dégage : **minéralisation N 2017 > minéralisation N 2015 et 2016**. Cette tendance se confirme pour la profondeur 20-25 cm avec une différence significative ($p=0,008$) se traduisant par une minéralisation de N supérieure en 2017 (a) par rapport à 2015 et 2016 (b) (cf. tableau 11). Le travail du sol de novembre 2016 sur 30 cm a distribué la MO plus en profondeur d'où une minéralisation plus élevée à partir de 15 cm en 2017.

1.5.3. Comparaison des deux variantes

Pour l'année 2015, soit avant la destruction du Miscanthus, aucune différence significative n'a été mise en évidence pour chaque profondeur entre la minéralisation de l'azote pour M et pour U ($p>0,05$).

En 2016, soit l'année suivant la destruction du Miscanthus pour la variante U, une différence significative de la minéralisation de l'azote a été mise en évidence entre U et M pour les deux profondeurs 10-15 cm ($p=0,002$) et 15-20 cm ($p=0,015$). La minéralisation observée pour U pour ces deux profondeurs est supérieure à celle de M du fait d'un travail du sol sur 15 cm suite à la destruction du Miscanthus, la MO ayant été redistribuée dans ces profondeurs.

Pour l'année 2017, une différence significative a été observée pour 20-25 cm de profondeur ($p=0,042$) avec une minéralisation de l'azote pour U supérieure à celle de M. En novembre 2016, il y a en effet eu un travail du sol sur 30 cm avant le semis du blé qui a redistribuée la MO en profondeur. Concernant la quantité totale d'azote minéralisé, elle est de 395,5 Nmin.kg⁻¹ au jour 35 d'incubation pour M et de 338,0 g Nmin.kg⁻¹ au jour 35 d'incubation pour U. Bien qu'elle semble plus élevée pour la variante M, il n'y a pas de différence significative avec U ($p=0,350$).

1.6. Evolution de l'azote minéral pour la variante U

La figure 28 présente l'évolution de la quantité d'azote minéral depuis la destruction du Miscanthus pour la variante U. Suite à aux coupes du mélange trèfle/luzerne, on observe une augmentation de la quantité d'azote minéral dans le sol qui s'accroît après le retournement de cette culture.

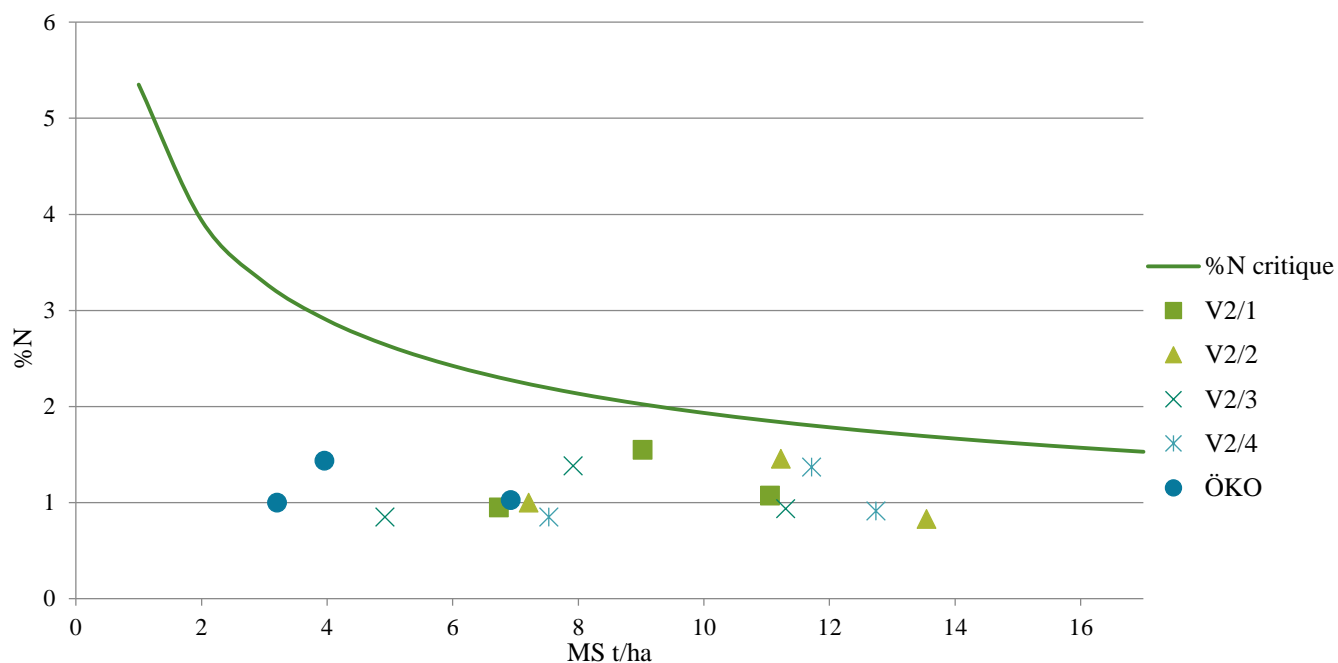


Figure 29 Courbe de dilution critique de l'azote

Date	Parcelle	INN
22/05/2017	V2/1	0,41
	V2/2	0,45
	V2/3	0,32
	V2/4	0,39
	ÖKO: parcelle de comparaison	0,31
07/06/2017	V2/1	0,77
	V2/2	0,79
	V2/3	0,64
	V2/4	0,76
	ÖKO	0,49
04/07/2017	V2/1	0,58
	V2/2	0,49
	V2/3	0,51
	V2/4	0,53
	ÖKO	0,45

Tableau 12 INN du blé des microparcelles U (variante 2) et de la parcelle de comparaison

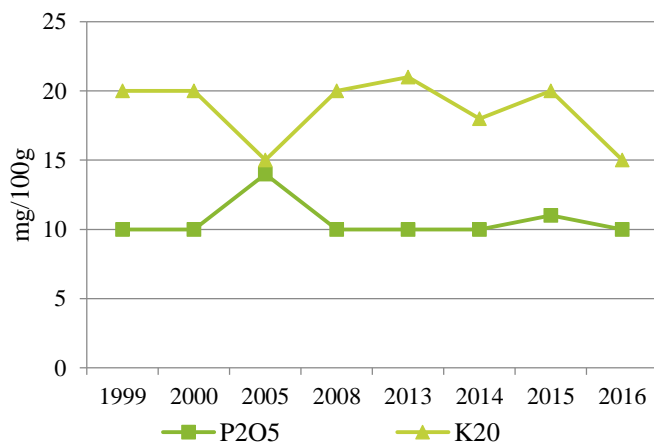


Figure 30 Evolution de la teneur en P₂O₅ et en K₂O dans le sol

Parcelle	Rendement (14 % humidité, q.ha ⁻¹)	Rendement moyen (14 % humidité, q.ha ⁻¹)
V2.1	43,02	45,77
V2.2	41,40	
V2.3	48,60	
V2.4	50,50	
ÖKO : Parcelle de comparaison	31,72	31,72

Tableau 13 Rendements pour les microparcelles de la variante U (V2) et pour la parcelle de comparaison

2. Disponibilité en éléments nutritifs dans le sol

2.1. Utilisation de l'azote par le blé

Comme le montre la figure 29 présentant la courbe de dilution critique de l'azote, pour l'ensemble des microparcelles de la variante U et les différentes dates d'analyse, le blé a une concentration en azote dans ses parties aériennes inférieure à la concentration critique souhaitée. Il en est de même pour la parcelle choisie comme comparaison cette année (ÖKO) et conduite sans fertilisation azotée.

L'INN ainsi déterminé (cf. tableau 12 et annexe 6) met en évidence une carence en azote ($INN < 1$) pour les différentes dates d'analyse et pour tous les traitements. Ainsi le 4 juillet 2017, 20 jours avant la récolte et avec un blé ayant déjà atteint sa maturité, on observe un INN moyen de 0,53 ce qui témoigne d'une carence en azote très limitante pour la culture. Néanmoins l'INN de la parcelle choisie comme comparaison est encore plus faible en fin de cycle avec une valeur de 0,45.

2.2. Evolution de P et K dans le sol

Les analyses de sols réalisées depuis 1999 nous permettent de suivre la tendance d'évolution des concentrations en phosphore assimilable (P_2O_5) et en potassium assimilable (K_2O) dans le sol (cf. figure 30).

La concentration en P_2O_5 du sol, de 20 mg/100g de sol en 1999, a diminué la première année suivant la destruction du Miscanthus en atteignant 15 mg/100g de sol soit une diminution de 25 %.

Quant à la concentration en K_2O , elle est restée constante à 15 mg/100g de sol de 1999 à 2016, soit jusqu'à l'année suivant la destruction du Miscanthus.

2.3. Rendements

Le rendement moyen obtenu pour le blé de la variante U est de 45,77 q.ha⁻¹. Il est supérieur à celui mesuré pour la parcelle utilisée comme comparaison qui est de 28,23 q.ha⁻¹ (à 14 % d'humidité) (cf. tableau 13).

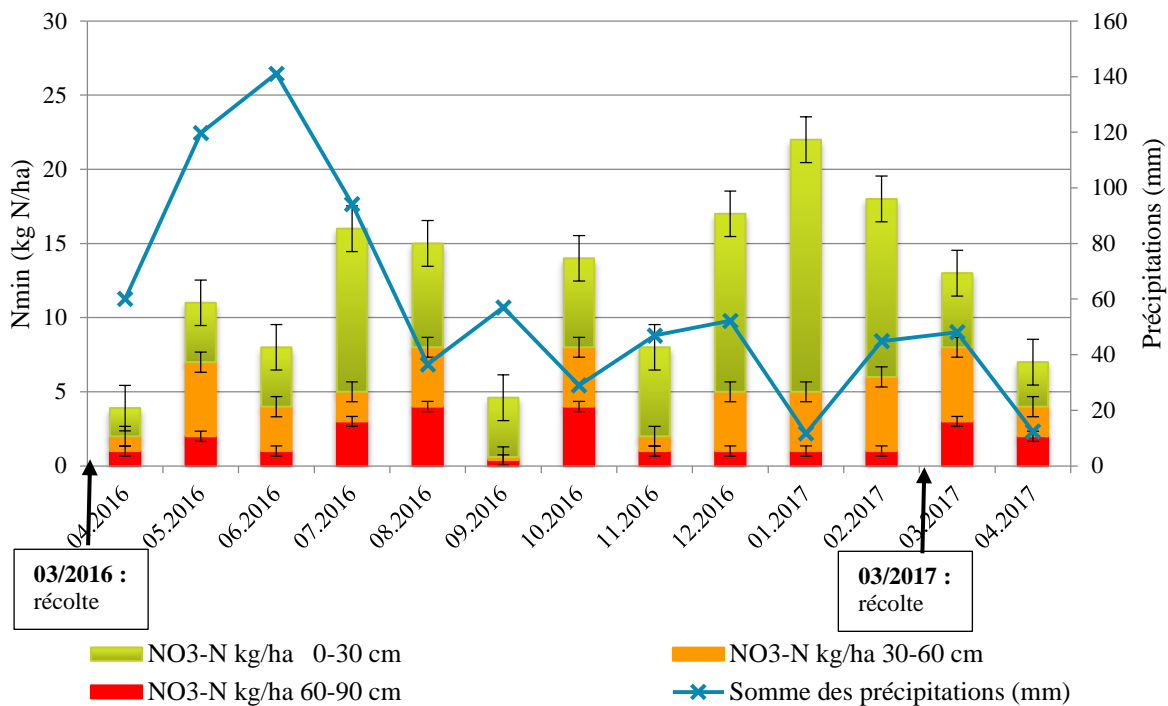


Figure 31 Evolution du Nmin sous Miscanthus (variante M)

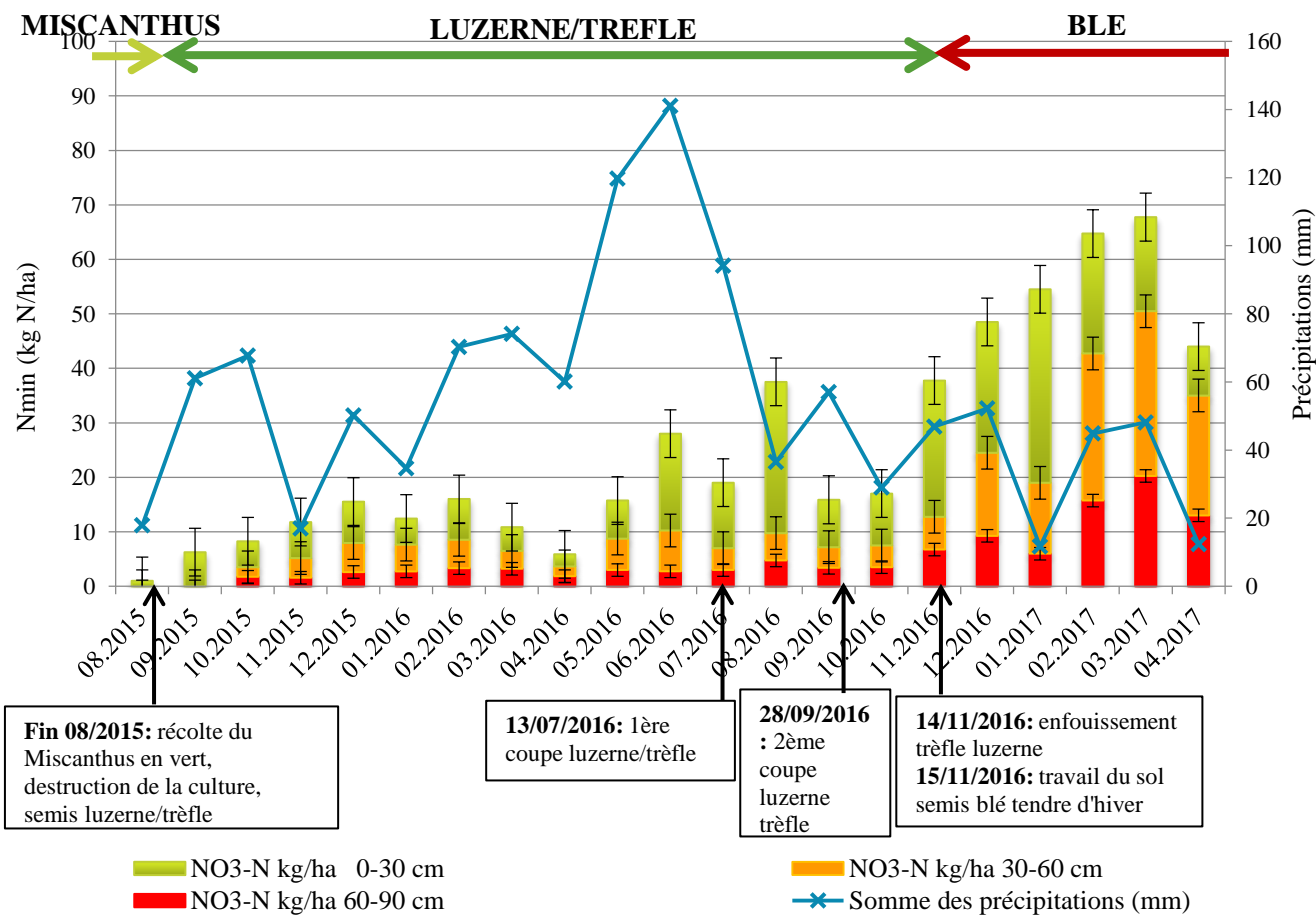


Figure 32 Evolution du Nmin pour la variante U (remise en culture)

3. Evaluation des pertes du système

3.1. Variante M

Sous Miscanthus (cf. figure 31) la quantité d'azote minéral est inférieure à $25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour toute l'année, en effet le Miscanthus absorbe de l'azote une bonne partie de l'année. De plus, l'azote minéral est concentré dans les 30 premiers centimètres de sol. Ainsi le risque de lixiviation des nitrates apparaît très faible sous Miscanthus, et peu impacté par les précipitations.

3.2. Variante U

La figure 32 représente l'évolution de la quantité de Nmin dans le sol et les précipitations pour la variante U.

Suite à la destruction du Miscanthus et jusqu'à la première coupe du mélange trèfle/luzerne en juillet 2016, la quantité de Nmin dans le sol est inférieure à $30 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ et principalement concentrée dans l'horizon de surface 0 à 30cm. Après la première coupe du mélange trèfle luzerne, on observe une augmentation de la quantité de Nmin dans sol résultant d'une augmentation de la minéralisation. Néanmoins cela n'est pas observé suite à la deuxième coupe fin septembre.

Suite au retournement du trèfle luzerne et au semis du blé en novembre 2016, on observe une augmentation de la quantité de Nmin dans le sol de 0 à 30 cm de profondeur. De plus on observe une diffusion de l'azote minéral en profondeur (30-90 cm) bien que les précipitations ne soient pas plus importantes que les mois précédents. Cette tendance est mise en évidence jusqu'en mars 2017.

En avril la quantité de Nmin dans le sol diminue, mais seulement de 0 à 30 cm profondeur, du fait de l'absorption par le blé qui reprend son développement de manière significative.

Cette augmentation de la quantité d'azote en profondeur sous blé induit un risque de lixiviation des nitrates plus important suite au retournement du trèfle/luzerne.

3.3. Comparaison des deux variantes

Le risque de lixiviation des nitrates sous Miscanthus semble négligeable. Néanmoins il est présent suite à la destruction du Miscanthus, surtout à partir de la deuxième année sous blé en sortie d'hiver.

4. Bilan azote

Le bilan azoté initialement prévu n'a pas pu être réalisé au moment de la rédaction de ce rapport. En effet, la quantification des pertes d'azote par lixiviation n'a pas pu être réalisée du fait de l'attente d'un accès au modèle souhaité.

IV. DISCUSSION DES RESULTATS

1. Quelle est l'évolution quantitative et qualitative de cette matière organique dans le sol ? Comment se dégrade-t-elle ?

1.1. Evolution de la MO sous Miscanthus

Entre 2015 et 2017, soit pour un Miscanthus âgé de plus de 20 ans, on observe une augmentation en Corg de 5,29% et ce principalement pour les 15 premiers centimètres de sol. Cela traduit un enrichissement en MO du sol et implique une densité apparente du sol plus faible pour ce même horizon. Cela entre en concordance avec les études précédemment menées par Kahle et al. (2001) et Dufossé et al. (2014) qui constatent une augmentation en Corg sous Miscanthus ainsi qu'un enrichissement en MO important jusqu'à 15 cm de profondeur (Dufossé et al., 2014) voire 30 cm (Kahle et al., 2001). De plus, cela permet de confirmer le fait que même après plus de 20 ans d'implantation, le Miscanthus continue d'enrichir le sol en MO.

Ensuite, bien que le C/N soit plus élevé pour les premiers centimètres de sol qu'en profondeur, la forte teneur en Corg combinée à une faible densité apparente, donc un sol plus poreux et donc aéré, induit une minéralisation de l'azote plus importante pour les 15 premiers centimètres de sol. Cela est observable et vérifié pour les trois années. La minéralisation est ainsi répartie de la façon suivante :

Minéralisation N 0-5 cm > minéralisation N 5-10 cm > minéralisation N 10-25 cm.

Ces résultats permettent de confirmer l'une des hypothèses émises : la minéralisation de l'azote diminue avec la profondeur sous Miscanthus du fait d'une teneur en MO plus élevée pour les horizons de surface.

Bien que diminuant en profondeur, la minéralisation de l'azote est toujours positive ce qui contredit les résultats d'Amougou et al. (2011) et de Beuch et al. (1998) évoquant une minéralisation négative, donc une immobilisation de l'azote par les microorganismes, pour les différents organes de Miscanthus (excepté les racines). Nos expérimentations d'incubation ont été menées sur des échantillons de sol et non des résidus de Miscanthus, ce qui est probablement un facteur induisant des résultats totalement différents.

En ce qui concerne l'évolution de la quantité d'azote totale dans le sol, il n'a pas été observé de différence significative (-0,05%) entre 2015 et 2016. Néanmoins il est difficile de tirer des conclusions après une année et on ne peut donc pas affirmer comme Dufossé et al. (2014) qu'il n'y a pas d'évolution significative à long terme sous Miscanthus.

1.2. Evolution de la MO suite à la destruction du Miscanthus et la remise en culture

Suite à la destruction du Miscanthus, une augmentation de 4,83% en Corg par rapport à 2015 a été observée. On pourrait être amené à penser que cette tendance perdurerait l'année suivante. Cependant une diminution de 1,53% de la quantité de totale de Corg par rapport à 2015 a été mise en évidence en 2017 ce qui traduit une diminution de la quantité de MO. La quantité de MO a donc tendance à diminuer suite à la destruction du Miscanthus, du fait qu'il n'y ait plus de restitutions de résidus importantes chaque année. On ne peut donc pas valider que l'enrichissement en MO du sol continue suite à la destruction du Miscanthus.

Suite aux travaux du sol en août 2015 (sur 15 cm) et en novembre 2016 (sur 30 cm), une redistribution de MO a été observée sur l'horizon travaillé avec une augmentation de la teneur en Corg de 15 à 30 cm de profondeur. Cela se traduit par une augmentation de la MO et une diminution de la densité apparente pour cet horizon de sol. Le sol est ainsi plus poreux, aéré et moins compact pour les parcelles remises en culture que sous Miscanthus.

Comme pour la variante M, on observe pour les trois années une minéralisation positive de l'azote ce qui entre à nouveau en contradiction avec les résultats d'Amougou et al. (2011) et de Beuch et al. (1998). Néanmoins, cette minéralisation est différente selon les années.

Pour l'année 2015, soit avant la destruction du Miscanthus, on observe une minéralisation pour U similaire à celle de M avec une minéralisation qui diminue en profondeur. Cela permet de confirmer l'hypothèse qu'il n'y avait pas de différence de potentiel de minéralisation de l'azote entre les deux variantes M et U avant la destruction du Miscanthus et de valider le dispositif expérimental pour le suivi de la minéralisation en conditions d'incubation.

Pour l'année 2016, la minéralisation est répartie de la manière suivante : **minéralisation N 0-15 cm > minéralisation N 15-25 cm**. En effet, suite à un travail du sol sur 15 cm, la quantité de Corg a augmenté entre 5 et 15 cm de profondeur, induisant une diminution de la densité apparente ce qui a favorisé la minéralisation bien que le C/N ait augmenté. Cela confirme l'hypothèse émise d'une redistribution de la MO en profondeur suite au travail du sol d'août 2015 (sur 15 cm) induisant une augmentation de la minéralisation de l'azote en profondeur sur l'horizon travaillé.

La deuxième année suivant la destruction du Miscanthus, soit en 2017, la minéralisation de l'azote est homogène sur l'ensemble de la profondeur étudiée (0 à 25 cm). Le travail du sol sur 30 cm en novembre 2016 a réparti la MO sur l'ensemble de l'horizon travaillé d'où une diminution de la minéralisation en surface et une augmentation en profondeur.

Enfin, la deuxième année suivant la destruction du Miscanthus il n'a pas été observé de diminution significative de la minéralisation de l'azote par rapport à la minéralisation sous Miscanthus (variante U année 2015). Il y a en effet eu des restitutions de MO fraîche au sol suite au retournement de la culture de trèfle/luzerne en novembre 2016. Ce retournement a été suivi d'une forte augmentation de Nmin dans le sol. Il est donc difficile d'évaluer l'impact du manque de restitutions de MO issues du Miscanthus sur la minéralisation de l'azote. On ne peut donc pas infirmer ou confirmer cette hypothèse : « pour l'année 3 (2017), il y a une diminution de la minéralisation de l'azote pour les parcelles U du fait d'une diminution importante des apports en MO ».

En ce qui concerne la teneur en azote total l'année suivant la destruction du Miscanthus, les résultats montrent une tendance à la hausse bien qu'il n'y ait pas de différence significative. Les résultats des années suivantes sont donc nécessaires pour confirmer ou infirmer cette tendance à l'augmentation.

2. Disponibilité en éléments nutritifs et utilisation par la culture

Les INN déterminés par la méthode de Justes et al. (1994) mettent en évidence des carences en azote importantes pour les parcelles de blé de la variante U (inférieur à 0,5 en fin de cycle). Néanmoins, le rendement moyen mesuré de 45,77 q.ha⁻¹ (à 14 % d'humidité) est tout à fait correct pour un blé conduit en agriculture biologique, surtout pour la variété Wiva offrant un potentiel de rendement peu élevé. Cependant la méthode utilisée ne prend pas en compte les facteurs liés à l'agriculture biologique. Si le blé est bien en carence azotée d'un point de vue physiologique cela ne signifie pas pour autant que la culture ne remplira pas les objectifs attendus en agriculture biologique.

Dufossé et al. (2014) a observé dans son étude, portant sur la remise en culture annuelle d'une parcelle de Miscanthus, un rendement similaire entre un blé précédent Miscanthus et une parcelle témoin de blé sans précédent Miscanthus. Dans notre étude, l'INN (0,45 en fin de cycle) et le rendement (31,72 q.ha⁻¹ à 14 % d'humidité) obtenus pour la parcelle de comparaison sont plus faibles que celui de notre essai. Néanmoins la parcelle de comparaison choisie pour cette année présente un sol de moindre qualité ce qui rend la comparaison délicate, on ne peut donc pas conclure sur la performance du système avec précédent Miscanthus.

On ne peut donc pas valider l'hypothèse supposant une libération d'éléments disponibles pour les cultures suivantes et répondant à leurs besoins, puisque la méthode utilisée pour évaluer les carences en azote n'est pas particulièrement adaptée à un système conduit en agriculture biologique et que la comparaison utilisée ne convient pas vraiment.

Concernant le P₂O₅ du sol, la diminution observée suite à la destruction du Miscanthus coïncide avec la diminution observée par Dufossé et al. (2014) après 20 ans de Miscanthus du fait d'absence de fertilisation. Aucune évolution n'a été constatée concernant le stock de K₂O dans le sol après la destruction du Miscanthus, ce qui diffère de l'augmentation observée sous Miscanthus par Kahle et al. (2001) ainsi que Beuch et al. (2000) et de la diminution après 20 ans de Miscanthus mesurée par Dufossé et al. (2014).

3. Y-a-t'il des pertes d'éléments nutritifs dans le système ?

Sous Miscanthus, la teneur en azote minéral dans le sol étant constamment inférieure à 25 kg.ha⁻¹ et concentrée en surface (0-30 cm), on peut estimer le risque de pertes de nitrates par lixiviation comme très faible. Cela est cohérent avec l'étude de Lesur et al., (2014) qui a mis en évidence une lixiviation de nitrates très faible sous Miscanthus pour différents sols (en moyenne 12 mg.L⁻¹) avec initialement 50 kg Nmin.ha⁻¹ en début d'hiver pour différents types de sol.

Pour la variante U, la quantité d'azote minéral dans le sol est faible les mois suivants la destruction du Miscanthus. Néanmoins, suite aux coupes et au retournement du mélange trèfle/luzerne, l'infiltration de l'azote minéral en profondeur (30 à 90 cm) sous blé met en évidence un risque de lixiviation des nitrates important. Toutefois, il est probable que cet azote minéral provienne majoritairement de la minéralisation suite au retournement du mélange trèfle/luzerne et peu de la minéralisation des résidus de Miscanthus. On ne peut cependant pas valider l'hypothèse supposant des pertes par lixiviation de nitrates très faibles voire négligeables suite à la destruction du Miscanthus.

	MISCANTHUS (M)				UMBRUCH (U)			
	2015	2016	2017	Evolution	2015	2016	2017	Evolution
Culture	Miscanthus	Miscanthus	Miscanthus		Miscanthus	Trèfle/luzerne	Blé	
Corg	75531 kg.ha ⁻¹	75147 kg.ha ⁻¹	79530 kg.ha ⁻¹	2015-2017 : +5,29 % surtout pour 0 à 10 cm	75531 kg.ha ⁻¹	79179 kg.ha ⁻¹	74376 kg.ha ⁻¹	2015-2017 : -1,53% Redistribution MO sur l'horizon travaillé
Densité apparente	Augmente avec la profondeur	Augmente avec la la profondeur	Augmente avec la profondeur	Da constante entre les 3 années car absence de travail du sol	Augmente avec la profondeur	Diminution pour 0-15 cm	Diminution pour 15-30 cm	Diminution de la Da pour l'horizon de sol travaillé → sol plus poreux et plus aéré
Nt	8376,4 kg.ha ⁻¹	8372,4 kg.ha ⁻¹	/	Pas d'évolution significative (-0,05 %)	8416,9 kg.ha ⁻¹	8715,8 kg.ha ⁻¹	/	Pas d'évolution significative (+3,55 %)
C/N	Diminue avec la profondeur	Diminue avec la profondeur	/	Pas d'évolution	Diminue avec la profondeur	Augmente pour 5-15cm	/	Augmentation pour l'horizon travaillé
Minéralisation azote	Diminue avec la profondeur	Diminue avec la profondeur	Diminue avec la la profondeur	Diminue avec la profondeur	Diminue avec la profondeur	Augmente pour 5-15cm	Homogène sur l'horizon travaillé 0-25cm	Redistribution de la minéralisation plus en profondeur du au travail du sol
P, K	/	/	/	/	/	/	/	P ₂ O ₅ : -5mg/100g K ₂ O : constant
Besoins N	/	/	/	/	/	/	INN<0,5 45,77 q.ha ⁻¹	Besoins en azote non remplis mais rendement correct

Tableau 14 Synthèse

4. Minéralisation nette de l'azote

Le bilan azote n'a pas pu être réalisé du fait de l'absence de quantification des pertes du système, l'utilisation du modèle INVAM est donc indispensable. Ce modèle, développé par le Technologiezentrum Wasser (TZW), permet de quantifier avec précision les pertes de nitrates par lixiviation sous Miscanthus mais également après sa destruction (Ball, 2017). Ce modèle, qui a déjà été utilisé pour des systèmes Miscanthus, est le plus adapté à notre dispositif expérimental.

5. Synthèse

Le tableau 14 ci-contre met en évidence l'évolution des différents paramètres mesurés pour les deux variantes M et U.

Suite à la destruction du Miscanthus, plusieurs points sont à relever :

- La quantité de MO dans le sol diminue du fait d'apports annuels au sol limités comparés aux restitutions importantes sous Miscanthus
- Le sol est plus poreux, aéré et moins compact suite à la remise en culture du fait d'un travail du sol
- Le ratio C/N du sol augmente, principalement en surface, ce qui témoigne d'un sol avec une activité biologique plus faible et donc une dégradation plus lente de la MO, voire une immobilisation de l'azote
- Malgré une tendance à la hausse, la quantité de Nt n'évolue pas de manière significative après remise en culture, comme sous Miscanthus
- La minéralisation de l'azote reste positive avec un potentiel qui n'évolue pas de manière significative entre les années malgré une diminution attendue du fait du manque de restitutions de MO issue du Miscanthus
- Le travail du sol a redistribué la MO sur l'horizon travaillé induisant une diminution de la densité apparente ce qui favorise la minéralisation pour cet horizon
- Les besoins de la culture en place la deuxième année après la destruction (blé) ne semblent pas être satisfaits malgré un rendement correct
- Il n'y a pas d'évolution significative de la teneur en K₂O du sol mais la quantité de P₂O₅ a diminué sous Miscanthus
- Le risque de lixiviation des nitrates est beaucoup plus important que sous Miscanthus

V. LIMITES DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES

1. Limites de la méthodologie

Comme il a été déjà mentionné précédemment, les méthodes et modèles utilisés (comme l'INN) ne sont pas forcément adaptés au contexte de l'agriculture biologique. Les résultats, n'étant parfois pas ceux attendus pour un système conventionnel, peuvent cependant répondre en partie aux objectifs de l'agriculture biologique. Ensuite, la parcelle voisine utilisée comme comparaison, bien qu'adaptée d'un point de vue système de culture (agriculture biologique) et pédoclimatique (sol similaire, mêmes conditions), peut cependant s'avérer être un facteur limitant pour le dispositif expérimental. En effet, cette parcelle appartient à un agriculteur et non au LTZ ce qui ne nous permet pas d'effectuer des choix tels que la culture en place pour une année donnée. Ce facteur, associé à la faible taille des parcelles de l'essai, rend parfois difficile la mise en place de la même culture sur les parcelles expérimentales du fait de machines inadaptées. La comparaison étant nécessaire à cette étude, il est important d'adapter nos choix en fonction de ceux réalisés pour la parcelle de comparaison.

2. Intérêts et limites de l'essai

Cette étude s'inscrivant dans un cadre particulier, celui de la remise en culture annuelle d'une parcelle de Miscanthus conduite en agriculture biologique, présente plusieurs intérêts qui ont été très peu étudiés pour le moment :

- Effet précédent du Miscanthus dans une succession culturale conduite en agriculture biologique
- Comparaison de l'évolution de paramètres agronomiques sous une culture de Miscanthus et après remise en culture
- Suivi d'une plantation âgée de Miscanthus (plus de 20 ans) sachant que c'est plus que la durée normale d'implantation

Néanmoins, dans un contexte d'essai en conditions réelles comme celui-ci, la difficulté est la multitude de facteurs entrant en jeu parfois difficilement quantifiables ou qualifiables. Par exemple, l'impact du mélange trèfle/luzerne sur la minéralisation de l'azote ne peut pas être évalué du fait qu'aucun suivi de la culture n'avait été effectué. Ainsi les résultats de ce travail sont à considérer dans le contexte particulier de notre essai.

3. Perspectives de travail

Une perspective de travail envisagée serait l'analyse compartimentale des MO par fractionnement qui permettrait d'évaluer la qualité des différentes MO du sol issues du Miscanthus et donc d'avoir plus d'éléments de réponse concernant leur dégradation.

Ensuite, pour aller plus loin concernant l'effet précédent du Miscanthus, il serait intéressant de s'intéresser à l'évolution des caractéristiques physiques du sol mais également à d'autres facteurs de développement des cultures comme l'enracinement.

CONCLUSION

Le Miscanthus, avec ses faibles besoins en intrants et induisant un enrichissement indéniable du sol en matière organique, est une plante pérenne ayant tout à fait sa place dans une succession culturale conduite en agriculture biologique. Néanmoins, comme l'ont mis en évidence une partie des résultats obtenus lors de cette étude, ses effets bénéfiques ne semblent pas perdurer au-delà de la première année suivant sa destruction.

La remise en culture annuelle d'une parcelle conduite pendant une longue période en culture pérenne est toujours une transition délicate du fait d'une gestion totalement différente de la parcelle et d'arrière effets variables de la culture pérenne. Cette étude a permis d'apporter des données sur cette phase délicate suivant la destruction du Miscanthus et la remise en cultures annuelles. Il est cependant nécessaire de poursuivre ce travail afin de confirmer ou infirmer les tendances et conclusions tirées de ces deux premières années.

Ce travail étant basé sur un dispositif expérimental au champ et conduit comme une parcelle représentative de la région, les résultats obtenus sont à considérer comme des références pour cette situation particulière.

Bibliographie

AMOUGOU N., 2011, *Importance des litières de Miscanthus x giganteus (feuilles sénescentes, racines et rhizomes) : Impact de leur décomposition sur la minéralisation de C et N dans un sol*, Thèse de doctorat.

AMOUGOU N., BERTRAND I., CADOUX S., RECOUS S., 2012, « Miscanthus × giganteus leaf senescence, decomposition and C and N inputs to soil », *GCB Bioenergy*, 4, 6, p. 698-707.

AMOUGOU N., BERTRAND I., MACHET J.-M., RECOUS S., 2011, « Quality and decomposition in soil of rhizome, root and senescent leaf from Miscanthus x giganteus, as affected by harvest date and N fertilization », *Plant and Soil*, 338, 1-2, p. 83-97.

BEUCH S., BOELCKE B., BELAU L., 1999, « Effect of the Organic Residues of Miscanthus giganteus on the Soil Organic Matter Level of Arable Soils »,.

BEUCH S., BELAU L., BOELCKE B., 1996, « Orientierende laboruntersuchungen zur umsetzung organischer rückstände beim anbau von *miscanthus x giganteus* (greek et deu.) », *Archives of Agronomy and Soil Science*, 40, 4, p. 271-281.

BEUCH S., BELAU L., BOELCKE B., 1998, « Modelluntersuchungen zur mineralisierung der biomasse von Miscanthus x giganteus (Mineralisierung von Miscanthusbiomasse) », *Archives of Agronomy and Soil Science*, 42, 5, p. 347-357.

BOT A., BENITES J., 2005, *The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production*, Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO soils bulletin), 78 p.

CHUNG J.-H., KIM D.-S., 2012, « Miscanthus as a potential bioenergy crop in East Asia », *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 15, 2, p. 65-77.

CLIFTON-BROWN J.C., BREUER J., JONES M.B., 2007, « Carbon mitigation by the energy crop, Miscanthus », *Global Change Biology*, 13, 11, p. 2296-2307.

DECOOPMAN B., HANOCQ DANIEL, HEDDADJ D., DIBET A., 2013, « Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le sol »,.

DUFOSSE K., DREWER J., GABRIELLE B., DROUET J.-L., 2014, « Effects of a 20-year old Miscanthus × giganteus stand and its removal on soil characteristics and greenhouse gas emissions », *Biomass and Bioenergy*, 69, p. 198-210.

FOEREID B., HØGH-JENSEN H., DE NEERGAARD A., 2004, « Turnover of organic matter in a Miscanthus field: effect of time in Miscanthus cultivation and inorganic nitrogen supply », *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 7, p. 1075-1085.

FONTAINE S., MARIOTTI A., ABBADIE L., 2003, « The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? », *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 6, p. 837-843.

GETREIDEZÜCHTUNG PETER KUNZ, 2016, « Wiwa - Weizen - Sorten - Getreidezüchtung Peter Kunz », *Getreidezüchtung*.

HANEMANN A.R., 2016, « Auswirkung von langjährigem Miscanthusanbau auf Humusvorrat und -qualität einer Parabraunerde im ökologischen Landbau », Masterarbeit am Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, FG. Düngung und Bodenstoffhaushalt, Universität Hohenheim, 76 p.

- HANSEN E.M., CHRISTENSEN B.T., JENSEN L.S., KRISTENSEN K., 2004, « Carbon sequestration in soil beneath long-term Miscanthus plantations as determined by ¹³C abundance », *Biomass and Bioenergy*, 26, p. 97-105.
- IDLER L., 2017, « Untersuchungen zu Humusqualität und C-Vorräten nach Umbruch eines 20-jährigen Miscanthusbestands über einen Zeitraum von 2 Jahren », Masterarbeit am Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, FG. Düngung und Bodenstoffhaushalt, Universität Hohenheim
- IFOAM, 1996, *Fundamentals of Organic Agriculture*, Troels V. Ostergaard, 270 p.
- INSTITUT TECHNIQUE DE L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE, 2000, « Protocole de suivi d'essais comparant des variétés de céréales à paille d'hiver en conduite biologique »,.
- JARVIS S.C., STOCKDALE E.A., SHEPERD M.A., POWLSON D.S., 1996, « Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils : processes and measurement », p. 235.
- JUSTES E., MARY B., MEYNARD J.-M., MACHET J.-M., THELIER-HUCHE L., 1994, « Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Whinter Wheat Crops », *Annals of Botany*, p. 397-407.
- KAHLE P., BELAU L., BOELCKE B., 2002, « Auswirkungen eines 10-jährigen Miscanthusanbaus auf ausgewählte Eigenschaften eines Mineralbodens in Nordostdeutschland », *Journal of Agronomy and Crop Science*, 188, 1, p. 43-50.
- KAHLE P., BEUCH S., BOELCKE B., LEINWEBER P., SCHULTEN H.-R., 2001, « Cropping of Miscanthus in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter », *European Journal of Agronomy*, 15, 3, p. 171–184.
- KUZYAKOV Y., 2010, « Priming effects: Interactions between living and dead organic matter », *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 9, p. 1363-1371.
- LESUR C., BAZOT M., BIO-BERI F., MARY B., JEUFFROY M.-H., LOYCE C., 2014, « Assessing nitrate leaching during the three-first years of Miscanthus × giganteus from on-farm measurements and modeling », *GCB Bioenergy*, 6, 4, p. 439-449.
- LEWANDOWSKI I., HEINZ A., 2003a, « Delayed harvest of miscanthus—influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production », *European Journal of Agronomy*, 19, 1, p. 45–63.
- LEWANDOWSKI I., CLIFTON-BROWN J.C., SCURLOCK J.M.O., HUISMAN W., 2000, « Miscanthus: European experience with a novel energy crop », *Biomass and Bioenergy*, 19, 4, p. 209–227.
- MARSCHNER P., RENGEL Z., 2007, *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*, Springer Science & Business Media, 409 p.
- RECOUS S., MACHET J.-M., JEUFFROY M.-H., 2011, « Les connaissances nouvelles sur le cycle de l'azote: en quoi et comment ont-elles été intégrées (ou pas) dans les OAD pour la fertilisation azotée? », 3. *Journée de Prospective du RMT Fertilisation and Environnement. 2011-01-07, Paris, FRA.*
- REGION ALSACE, 1999, « Guide des sols - Plaine Sud Alsace ».

SACALA E., 2011, « Biochemical and Physiological Characteristic: A Review », *Ecological Chemistry and Engineering. A*, 18, 12, p. 1615–1624.

BALL T., 2017, INVAM Simulationsrechnungen, Besprechung beim Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg, Außenstelle Forchheim am 27.01.2017, Technologiezentrum Wasser

VALBIOM, 2009, « Les utilisations du miscanthus ».

Annexes

ANNEXE 1 : Comparaison des sols de la parcelle d'expérimentation et de la parcelle de comparaison, tests et résultats statistiques	i
ANNEXE 2 : Densité apparente, tests et résultats statistiques.....	ii
ANNEXE 3 : Azote total Nt, tests et résultats statistiques.....	iii
ANNEXE 4 : Résultats suivi de minéralisation.....	iv
ANNEXE 5 : Test et résultats statistiques pour le suivi de minéralisation.....	x
ANNEXE 6 : Résultats complets pour le calcul de l'INN.....	xix

ANNEXE 1 : Comparaison des sols de la parcelle d'expérimentation et de la parcelle de comparaison, tests et résultats statistiques

- **Comparaison de la teneur en argile entre la parcelle d'essai et la parcelle de comparaison**

t-test

Normality Test (Shapiro-Wilk): Passed (P = 0,513)

Equal Variance Test (Brown-Forsythe): Passed (P = 0,210)

Group	Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM		
Col 1		5		0	18,940	2,152		0,963
Col 2		5		0	17,120	3,706		1,657

Difference 1,820

t = 0,950 with 8 degrees of freedom.

95 percent two-tailed confidence interval for difference of means: -2,599 to 6,239

Two-tailed P-value = 0,370

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,370).

- **Comparaison de la teneur en limon entre la parcelle d'essai et la parcelle de comparaison**

t-test

Normality Test (Shapiro-Wilk): Passed (P = 0,114)

Equal Variance Test (Brown-Forsythe): Passed (P = 0,125)

Group	Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM		
Col 4		5		0	72,460	0,134		0,0600
Col 5		5		0	74,700	2,366		1,058

Difference -2,240

t = -2,113 with 8 degrees of freedom.

95 percent two-tailed confidence interval for difference of means: -4,684 to 0,204

Two-tailed P-value = 0,0675

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,068).

- **Comparaison de la teneur en sable entre la parcelle d'essai et la parcelle de comparaison**

t-test

Normality Test (Shapiro-Wilk): Failed (P < 0,050)

Test execution ended by user request, Rank Sum Test begun

Mann-Whitney Rank Sum Test Donnerstag, August 31, 2017, 16:05:51

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%	
Col 7	5	0	9,600	7,500	10,450	
Col 8	5	0	8,400	6,800	9,750	

Mann-Whitney U Statistic= 7,500

T = 32,500 n(small)= 5 n(big)= 5 P(est.)= 0,344 P(exact)= 0,310

The difference in the median values between the two groups is not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P = 0,310)

ANNEXE 2 : Densité apparente, tests statistiques

- **Comparaison de la densité apparente entre les deux variantes U et M pour l'année 2017**

t-test

Normality Test (Shapiro-Wilk): Failed ($P < 0,050$)

Test execution ended by user request, Rank Sum Test begun

Mann-Whitney Rank Sum Test Freitag, September 01, 2017, 09:58:36

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%
Col 7	13	1	1,585	1,553	1,590
Col 8	13	1	1,505	1,335	1,558

Mann-Whitney U Statistic= 25,500

T = 196,500 n (small)= 12 n(big)= 12 ($P = 0,008$)

The difference in the median values between the two groups is greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference ($P = 0,008$)

ANNEXE 3 : Azote total Nt, tests et résultats statistiques

• Comparaison Nt 2015/2016 MISCANTHUS

t-test

Normality Test: Failed (P < 0,050)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,163)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Mis2015	16	0	8303,625	607,663	151,916
Mis2016	16	0	8348,940	338,812	84,703

Difference -386,149

t = -0,261 with 30 degrees of freedom. (P = 0,796)

95 percent confidence interval for difference of means: -400,536 to 309,905

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,796).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050

• Comparaison 2015/2016 UMBRUCH

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,127)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,249)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
U2015	16	0	8423,376	425,422	106,355
U2016	16	0	8735,089	682,868	170,717

Difference -311,713

t = -1,550 with 30 degrees of freedom. (P = 0,132)

95 percent confidence interval for difference of means: -722,488 to 99,062

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,132).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,196

The power of the performed test (0,196) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

• Comparaison MISCANTHUS/UMBRUCH, 2016, 5-10cm

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,523)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,289)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	884,102	31,957	15,979
Umbruch	4	0	968,390	19,758	9,879

Difference -84,288

t = -4,487 with 6 degrees of freedom. (P = 0,004)

95 percent confidence interval for difference of means: -130,255 to -38,320

The difference in the mean values of the two groups is greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference between the input groups (P = 0,004). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,957

• Comparaison MISCANTHUS/UMBRUCH, 2016, 25-30cm

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,885)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,854)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	677,411	59,401	29,700
Umbruch	4	0	801,292	61,264	30,632

Difference -123,882

t = -2,903 with 6 degrees of freedom. (P = 0,027)

95 percent confidence interval for difference of means: -228,283 to -19,481

The difference in the mean values of the two groups is greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference between the input groups (P = 0,027). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,627

• Comparaison MISCANTHUS/UMBRUCH, 2016, 30-35cm

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,969)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,950)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	619,518	61,567	30,783
Umbruch	4	0	741,444	58,659	29,330

Difference -121,926

t = -2,868 with 6 degrees of freedom. (P = 0,029)

95 percent confidence interval for difference of means: -225,966 to -17,887

The difference in the mean values of the two groups is greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference between the input groups (P = 0,029). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,615

ANNEXE 4 : Résultats suivi de minéralisation

Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)	Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)
1	2015	0	1	Miscanthus	0-5 cm	1,2	43,2	44,3	308	2016	15	3	Miscanthus	0-5 cm	138,7	0,2	138,9
2	2015	0	1	Miscanthus	5-10 cm	0,6	24,7	25,3	309	2016	15	3	Miscanthus	5-10 cm	45,3	3,1	48,4
3	2015	0	1	Miscanthus	10-15 cm	1,5	9,4	10,9	310	2016	15	3	Miscanthus	10-15 cm	18,8	2,6	21,4
4	2015	0	1	Miscanthus	15-20 cm	1,8	7,3	9,1	311	2016	15	3	Miscanthus	15-20 cm	13,6	2,2	15,9
5	2015	0	1	Miscanthus	20-25 cm	0,0	5,2	5,3	312	2016	15	3	Miscanthus	20-25 cm	12,1	1,2	13,2
6	2015	0	1	Umbruch	0-5 cm	4,4	22,5	26,9	313	2016	15	3	Umbruch	0-5 cm	102,8	0,2	103,0
7	2015	0	1	Umbruch	5-10 cm	3,4	26,8	30,2	314	2016	15	3	Umbruch	5-10 cm	88,4	0,2	88,6
8	2015	0	1	Umbruch	10-15 cm	1,1	13,5	14,6	315	2016	15	3	Umbruch	10-15 cm	61,2	0,2	61,4
9	2015	0	1	Umbruch	15-20 cm	1,6	7,2	8,8	316	2016	15	3	Umbruch	15-20 cm	28,6	0,2	28,8
10	2015	0	1	Umbruch	20-25 cm	2,7	5,7	8,4	317	2016	15	3	Umbruch	20-25 cm	36,2	1,0	37,2
11	2015	0	2	Miscanthus	0-5 cm	0,6	44,6	45,2	318	2016	15	4	Miscanthus	0-5 cm	116,8	0,2	117,0
12	2015	0	2	Miscanthus	5-10 cm	1,4	24,7	26,1	319	2016	15	4	Miscanthus	5-10 cm	74,6	0,0	74,6
13	2015	0	2	Miscanthus	10-15 cm	3,3	9,0	12,3	320	2016	15	4	Miscanthus	10-15 cm	23,5	0,7	24,2
14	2015	0	2	Miscanthus	15-20 cm	0,9	9,9	10,8	321	2016	15	4	Miscanthus	15-20 cm	24,3	0,4	24,8
15	2015	0	2	Miscanthus	20-25 cm	1,3	15,1	16,4	322	2016	15	4	Miscanthus	20-25 cm	15,4	2,6	18,0
16	2015	0	2	Umbruch	0-5 cm	1,1	41,7	42,8	323	2016	15	4	Umbruch	0-5 cm	76,0	0,1	76,1
17	2015	0	2	Umbruch	5-10 cm	2,1	14,2	16,3	324	2016	15	4	Umbruch	5-10 cm	87,1	0,6	87,6
18	2015	0	2	Umbruch	10-15 cm	0,2	8,6	8,8	325	2016	15	4	Umbruch	10-15 cm	34,8	0,6	35,3
19	2015	0	2	Umbruch	15-20 cm	2,4	7,6	10,1	326	2016	15	4	Umbruch	15-20 cm	60,8	0,1	60,9
20	2015	0	2	Umbruch	20-25 cm	1,3	5,6	6,9	327	2016	15	4	Umbruch	20-25 cm	39,2	0,1	39,3
21	2015	0	3	Miscanthus	0-5 cm	1,3	34,0	35,3	329	2017	15	1	Miscanthus	0-5 cm	128,1	0,2	128,3
22	2015	0	3	Miscanthus	5-10 cm	3,7	17,9	21,7	330	2017	15	1	Miscanthus	5-10 cm	69,1	0,2	69,3
23	2015	0	3	Miscanthus	10-15 cm	2,4	8,5	10,9	331	2017	15	1	Miscanthus	10-15 cm	30,8	0,1	30,9
24	2015	0	3	Miscanthus	15-20 cm	3,3	6,6	9,8	332	2017	15	1	Miscanthus	15-20 cm	27,9	0,1	28,0
25	2015	0	3	Miscanthus	20-25 cm	0,0	5,2	5,3	333	2017	15	1	Miscanthus	20-25 cm	20,1	0,2	20,3
26	2015	0	3	Umbruch	0-5 cm	6,9	47,5	54,4	334	2017	15	1	Umbruch	0-5 cm	68,6	0,1	68,7
27	2015	0	3	Umbruch	5-10 cm	2,1	21,1	23,3	335	2017	15	1	Umbruch	5-10 cm	49,6	0,1	49,7
28	2015	0	3	Umbruch	10-15 cm	0,3	9,8	10,1	336	2017	15	1	Umbruch	10-15 cm	46,2	0,1	46,2
29	2015	0	3	Umbruch	15-20 cm	5,4	6,3	11,7	337	2017	15	1	Umbruch	15-20 cm	36,6	0,1	36,6
30	2015	0	3	Umbruch	20-25 cm	3,7	5,7	9,4	338	2017	15	1	Umbruch	20-25 cm	21,7	0,3	22,0
31	2015	0	4	Miscanthus	0-5 cm	12,8	38,8	51,7	339	2017	15	2	Miscanthus	0-5 cm	154,0	0,2	154,2
32	2015	0	4	Miscanthus	5-10 cm	10,3	20,0	30,3	340	2017	15	2	Miscanthus	5-10 cm	45,3	21,3	66,6
33	2015	0	4	Miscanthus	10-15 cm	2,9	7,2	10,1	341	2017	15	2	Miscanthus	10-15 cm	29,6	0,8	30,4
34	2015	0	4	Miscanthus	15-20 cm	10,4	6,7	17,1	342	2017	15	2	Miscanthus	15-20 cm	28,6	2,0	30,6
35	2015	0	4	Miscanthus	20-25 cm	8,4	4,7	13,1	343	2017	15	2	Miscanthus	20-25 cm	25,9	0,3	26,2
36	2015	0	4	Umbruch	0-5 cm	17,8	39,3	57,1	344	2017	15	2	Umbruch	0-5 cm	21,7	0,1	21,8
37	2015	0	4	Umbruch	5-10 cm	7,8	16,7	24,5	345	2017	15	2	Umbruch	5-10 cm	51,9	0,1	52,0
38	2015	0	4	Umbruch	10-15 cm	9,6	8,5	18,1	346	2017	15	2	Umbruch	10-15 cm	58,0	0,1	58,1
39	2015	0	4	Umbruch	15-20 cm	10,1	5,8	15,9	347	2017	15	2	Umbruch	15-20 cm	60,2	0,1	60,3
40	2015	0	4	Umbruch	20-25 cm	6,4	5,3	11,7	348	2017	15	2	Umbruch	20-25 cm	91,5	0,2	91,7
42	2016	0	1	Miscanthus	0-5 cm	15,6	48,9	64,5	349	2017	15	3	Miscanthus	0-5 cm	157,6	0,2	157,8
43	2016	0	1	Miscanthus	5-10 cm	0,0	15,2	15,3	350	2017	15	3	Miscanthus	5-10 cm	66,7	0,2	66,9
44	2016	0	1	Miscanthus	10-15 cm	0,0	5,2	5,2	351	2017	15	3	Miscanthus	10-15 cm	28,8	3,3	32,1
45	2016	0	1	Miscanthus	15-20 cm	0,0	4,4	4,5	352	2017	15	3	Miscanthus	15-20 cm	36,9	0,8	37,7
46	2016	0	1	Miscanthus	20-25 cm	0,0	3,5	3,5	353	2017	15	3	Miscanthus	20-25 cm	20,2	3,2	23,4
47	2016	0	1	Umbruch	0-5 cm	38,2	12,2	50,4	354	2017	15	3	Umbruch	0-5 cm	53,1	0,2	53,3
48	2016	0	1	Umbruch	5-10 cm	9,7	12,3	22,0	355	2017	15	3	Umbruch	5-10 cm	58,4	0,1	58,5
49	2016	0	1	Umbruch	10-15 cm	5,8	6,1	11,9	356	2017	15	3	Umbruch	10-15 cm	60,6	0,1	60,6
50	2016	0	1	Umbruch	15-20 cm	0,9	5,6	6,5	357	2017	15	3	Umbruch	15-20 cm	57,9	0,1	58,0

Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)	Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)
51	2016	0	1	Umbruch	20-25 cm	1,7	3,6	5,3	358	2017	15	3	Umbruch	20-25 cm	54,7	0,1	54,8
52	2016	0	2	Miscanthus	0-5 cm	36,0	36,0	72,0	359	2017	15	4	Miscanthus	0-5 cm	118,3	0,2	118,5
53	2016	0	2	Miscanthus	5-10 cm	1,4	13,1	14,6	360	2017	15	4	Miscanthus	5-10 cm	47,5	0,4	47,9
54	2016	0	2	Miscanthus	10-15 cm	0,0	6,5	6,6	361	2017	15	4	Miscanthus	10-15 cm	32,6	0,1	32,7
55	2016	0	2	Miscanthus	15-20 cm	0,0	5,6	5,6	362	2017	15	4	Miscanthus	15-20 cm	40,9	0,1	41,0
56	2016	0	2	Miscanthus	20-25 cm	0,6	4,5	5,1	363	2017	15	4	Miscanthus	20-25 cm	23,0	0,1	23,1
57	2016	0	2	Umbruch	0-5 cm	7,5	26,4	33,9	364	2017	15	4	Umbruch	0-5 cm	65,1	0,1	65,2
58	2016	0	2	Umbruch	5-10 cm	2,1	22,0	24,2	365	2017	15	4	Umbruch	5-10 cm	49,8	0,1	49,8
59	2016	0	2	Umbruch	10-15 cm	0,1	14,6	14,7	366	2017	15	4	Umbruch	10-15 cm	85,9	0,1	86,0
60	2016	0	2	Umbruch	15-20 cm	0,0	7,6	7,6	367	2017	15	4	Umbruch	15-20 cm	85,2	0,2	85,4
61	2016	0	2	Umbruch	20-25 cm	0,0	6,3	6,3	368	2017	15	4	Umbruch	20-25 cm	32,2	0,1	32,3
62	2016	0	3	Miscanthus	0-5 cm	0,0	38,4	38,4	370	2015	26	1	Miscanthus	0-5 cm	162,7	0,2	162,9
63	2016	0	3	Miscanthus	5-10 cm	0,5	21,1	21,6	371	2015	26	1	Miscanthus	5-10 cm	44,6	8,8	53,5
64	2016	0	3	Miscanthus	10-15 cm	0,4	7,5	7,9	372	2015	26	1	Miscanthus	10-15 cm	42,4	0,6	42,9
65	2016	0	3	Miscanthus	15-20 cm	0,3	6,5	6,8	373	2015	26	1	Miscanthus	15-20 cm	34,0	0,3	34,3
66	2016	0	3	Miscanthus	20-25 cm	0,1	5,0	5,1	374	2015	26	1	Miscanthus	20-25 cm	29,4	0,6	30,0
67	2016	0	3	Umbruch	0-5 cm	21,6	20,6	42,2	375	2015	26	1	Umbruch	0-5 cm	108,8	0,2	109,0
68	2016	0	3	Umbruch	5-10 cm	17,8	26,4	44,1	376	2015	26	1	Umbruch	5-10 cm	63,2	3,2	66,4
69	2016	0	3	Umbruch	10-15 cm	0,0	19,2	19,2	377	2015	26	1	Umbruch	10-15 cm	46,7	1,3	48,0
70	2016	0	3	Umbruch	15-20 cm	0,1	10,3	10,4	378	2015	26	1	Umbruch	15-20 cm	15,8	0,6	16,4
71	2016	0	3	Umbruch	20-25 cm	1,6	7,5	9,1	379	2015	26	1	Umbruch	20-25 cm	21,5	0,2	21,7
72	2016	0	4	Miscanthus	0-5 cm	2,9	30,7	33,6	380	2015	26	2	Miscanthus	0-5 cm	121,9	0,2	122,1
73	2016	0	4	Miscanthus	5-10 cm	0,0	21,6	21,6	381	2015	26	2	Miscanthus	5-10 cm	69,1	4,8	73,9
74	2016	0	4	Miscanthus	10-15 cm	0,2	7,1	7,3	382	2015	26	2	Miscanthus	10-15 cm	39,5	0,6	40,0
75	2016	0	4	Miscanthus	15-20 cm	0,0	6,2	6,2	383	2015	26	2	Miscanthus	15-20 cm	42,1	0,4	42,6
76	2016	0	4	Miscanthus	20-25 cm	0,1	6,2	6,4	384	2015	26	2	Miscanthus	20-25 cm	26,5	0,3	26,8
77	2016	0	4	Umbruch	0-5 cm	29,4	24,0	53,4	385	2015	26	2	Umbruch	0-5 cm	136,1	0,3	136,4
78	2016	0	4	Umbruch	5-10 cm	2,2	21,6	23,7	386	2015	26	2	Umbruch	5-10 cm	34,3	4,0	38,4
79	2016	0	4	Umbruch	10-15 cm	1,3	20,2	21,5	387	2015	26	2	Umbruch	10-15 cm	33,6	0,6	34,2
80	2016	0	4	Umbruch	15-20 cm	0,4	12,8	13,1	388	2015	26	2	Umbruch	15-20 cm	33,2	0,1	33,3
81	2016	0	4	Umbruch	20-25 cm	13,5	7,2	20,8	389	2015	26	2	Umbruch	20-25 cm	25,7	0,1	25,8
83	2017	0	1	Miscanthus	0-5 cm	17,1	39,3	56,5	390	2015	26	3	Miscanthus	0-5 cm	106,1	0,2	106,3
84	2017	0	1	Miscanthus	5-10 cm	1,3	10,0	11,3	391	2015	26	3	Miscanthus	5-10 cm	34,1	6,7	40,8
85	2017	0	1	Miscanthus	10-15 cm	1,1	6,7	7,8	392	2015	26	3	Miscanthus	10-15 cm	34,1	0,2	34,3
86	2017	0	1	Miscanthus	15-20 cm	2,2	4,3	6,5	393	2015	26	3	Miscanthus	15-20 cm	28,0	0,1	28,0
87	2017	0	1	Miscanthus	20-25 cm	4,3	4,3	8,6	394	2015	26	3	Miscanthus	20-25 cm	24,6	0,7	25,3
88	2017	0	1	Umbruch	0-5 cm	27,2	2,2	29,4	395	2015	26	3	Umbruch	0-5 cm	145,4	0,1	145,5
89	2017	0	1	Umbruch	5-10 cm	38,1	0,6	38,7	396	2015	26	3	Umbruch	5-10 cm	52,1	5,1	57,2
90	2017	0	1	Umbruch	10-15 cm	24,9	4,0	29,0	397	2015	26	3	Umbruch	10-15 cm	40,1	0,3	40,4
91	2017	0	1	Umbruch	15-20 cm	8,0	3,2	11,2	398	2015	26	3	Umbruch	15-20 cm	33,5	0,1	33,6
92	2017	0	1	Umbruch	20-25 cm	11,4	2,9	14,2	399	2015	26	3	Umbruch	20-25 cm	24,1	0,1	24,2
93	2017	0	2	Miscanthus	0-5 cm	30,2	46,0	76,2	400	2015	26	4	Miscanthus	0-5 cm	139,7	0,4	140,1
94	2017	0	2	Miscanthus	5-10 cm	0,4	28,3	28,7	401	2015	26	4	Miscanthus	5-10 cm	57,1	0,2	57,3
95	2017	0	2	Miscanthus	10-15 cm	0,8	10,0	10,8	402	2015	26	4	Miscanthus	10-15 cm	46,2	0,1	46,3
96	2017	0	2	Miscanthus	15-20 cm	0,4	6,8	7,3	403	2015	26	4	Miscanthus	15-20 cm	38,4	0,1	38,5
97	2017	0	2	Miscanthus	20-25 cm	2,3	4,1	6,4	404	2015	26	4	Miscanthus	20-25 cm	24,6	0,1	24,7
98	2017	0	2	Umbruch	0-5 cm	9,8	4,4	14,2	405	2015	26	4	Umbruch	0-5 cm	131,4	0,1	131,5
99	2017	0	2	Umbruch	5-10 cm	38,0	1,1	39,1	406	2015	26	4	Umbruch	5-10 cm	63,6	0,1	63,7
100	2017	0	2	Umbruch	10-15 cm	42,4	0,8	43,3	407	2015	26	4	Umbruch	10-15 cm	46,8	0,1	46,9

Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répetition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)	Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répetition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)
101	2017	0	2	Umbruch	15-20 cm	48,7	0,4	49,1	408	2015	26	4	Umbruch	15-20 cm	40,3	0,1	40,4
102	2017	0	2	Umbruch	20-25 cm	53,0	0,0	53,1	409	2015	26	4	Umbruch	20-25 cm	35,6	0,1	35,7
103	2017	0	3	Miscanthus	0-5 cm	19,4	32,9	52,3	411	2016	26	1	Miscanthus	0-5 cm	148,6	0,2	148,8
104	2017	0	3	Miscanthus	5-10 cm	0,6	20,7	21,3	412	2016	26	1	Miscanthus	5-10 cm	58,3	0,2	58,5
105	2017	0	3	Miscanthus	10-15 cm	0,8	8,9	9,7	413	2016	26	1	Miscanthus	10-15 cm	8,4	2,2	10,6
106	2017	0	3	Miscanthus	15-20 cm	0,3	7,0	7,3	414	2016	26	1	Miscanthus	15-20 cm	21,2	0,1	21,3
107	2017	0	3	Miscanthus	20-25 cm	0,4	7,2	7,6	415	2016	26	1	Miscanthus	20-25 cm	7,9	1,6	9,6
108	2017	0	3	Umbruch	0-5 cm	17,8	4,6	22,5	416	2016	26	1	Umbruch	0-5 cm	94,2	0,1	94,3
109	2017	0	3	Umbruch	5-10 cm	28,3	5,6	33,9	417	2016	26	1	Umbruch	5-10 cm	57,6	0,1	57,7
110	2017	0	3	Umbruch	10-15 cm	10,4	4,7	15,2	418	2016	26	1	Umbruch	10-15 cm	18,2	0,1	18,3
111	2017	0	3	Umbruch	15-20 cm	26,0	0,8	26,7	419	2016	26	1	Umbruch	15-20 cm	20,0	0,1	20,1
112	2017	0	3	Umbruch	20-25 cm	16,2	6,3	22,6	420	2016	26	1	Umbruch	20-25 cm	26,6	0,1	26,7
113	2017	0	4	Miscanthus	0-5 cm	25,4	31,9	57,2	421	2016	26	2	Miscanthus	0-5 cm	97,7	0,2	97,9
114	2017	0	4	Miscanthus	5-10 cm	0,4	14,1	14,4	422	2016	26	2	Miscanthus	5-10 cm	67,2	0,2	67,4
115	2017	0	4	Miscanthus	10-15 cm	0,6	7,2	7,8	423	2016	26	2	Miscanthus	10-15 cm	1,0	2,8	3,8
116	2017	0	4	Miscanthus	15-20 cm	2,7	8,2	10,9	424	2016	26	2	Miscanthus	15-20 cm	3,2	0,6	3,8
117	2017	0	4	Miscanthus	20-25 cm	3,4	4,6	8,0	425	2016	26	2	Miscanthus	20-25 cm	12,1	0,1	12,2
118	2017	0	4	Umbruch	0-5 cm	39,6	0,5	40,1	426	2016	26	2	Umbruch	0-5 cm	93,2	0,1	93,3
119	2017	0	4	Umbruch	5-10 cm	32,9	1,6	34,4	427	2016	26	2	Umbruch	5-10 cm	73,4	0,1	73,5
120	2017	0	4	Umbruch	10-15 cm	71,3	0,1	71,3	428	2016	26	2	Umbruch	10-15 cm	103,9	0,1	104,0
121	2017	0	4	Umbruch	15-20 cm	56,4	0,1	56,5	429	2016	26	2	Umbruch	15-20 cm	26,5	0,8	27,3
122	2017	0	4	Umbruch	20-25 cm	41,0	0,1	41,1	430	2016	26	2	Umbruch	20-25 cm	22,8	0,2	23,0
124	2015	6	1	Miscanthus	0-5 cm	17,6	54,0	71,6	431	2016	26	3	Miscanthus	0-5 cm	123,6	0,2	123,8
125	2015	6	1	Miscanthus	5-10 cm	4,4	25,7	30,1	432	2016	26	3	Miscanthus	5-10 cm	55,2	0,2	55,4
126	2015	6	1	Miscanthus	10-15 cm	9,8	8,5	18,3	433	2016	26	3	Miscanthus	10-15 cm	10,7	3,0	13,6
127	2015	6	1	Miscanthus	15-20 cm	9,2	5,4	14,6	434	2016	26	3	Miscanthus	15-20 cm	24,5	0,1	24,6
128	2015	6	1	Miscanthus	20-25 cm	6,6	4,9	11,5	435	2016	26	3	Miscanthus	20-25 cm	10,6	0,3	10,9
129	2015	6	1	Umbruch	0-5 cm	39,0	15,8	54,8	436	2016	26	3	Umbruch	0-5 cm	116,5	0,1	116,6
130	2015	6	1	Umbruch	5-10 cm	2,8	34,5	37,3	437	2016	26	3	Umbruch	5-10 cm	102,7	0,1	102,8
131	2015	6	1	Umbruch	10-15 cm	11,8	12,5	24,2	438	2016	26	3	Umbruch	10-15 cm	97,6	0,1	97,6
132	2015	6	1	Umbruch	15-20 cm	5,9	5,6	11,5	439	2016	26	3	Umbruch	15-20 cm	39,6	0,1	39,7
133	2015	6	1	Umbruch	20-25 cm	3,8	4,8	8,6	440	2016	26	3	Umbruch	20-25 cm	23,4	0,1	23,5
134	2015	6	2	Miscanthus	0-5 cm	34,7	39,3	74,0	441	2016	26	4	Miscanthus	0-5 cm	122,2	0,2	122,4
135	2015	6	2	Miscanthus	5-10 cm	6,8	22,5	29,4	442	2016	26	4	Miscanthus	5-10 cm	77,8	0,2	78,0
136	2015	6	2	Miscanthus	10-15 cm	13,3	7,5	20,8	443	2016	26	4	Miscanthus	10-15 cm	43,3	0,1	43,4
137	2015	6	2	Miscanthus	15-20 cm	5,6	9,9	15,6	444	2016	26	4	Miscanthus	15-20 cm	33,6	0,1	33,7
138	2015	6	2	Miscanthus	20-25 cm	4,6	5,3	9,8	445	2016	26	4	Miscanthus	20-25 cm	12,1	0,1	12,2
139	2015	6	2	Umbruch	0-5 cm	16,4	49,1	65,5	446	2016	26	4	Umbruch	0-5 cm	145,2	0,1	145,3
140	2015	6	2	Umbruch	5-10 cm	5,4	15,0	20,4	447	2016	26	4	Umbruch	5-10 cm	81,7	0,1	81,8
141	2015	6	2	Umbruch	10-15 cm	6,4	10,3	16,6	448	2016	26	4	Umbruch	10-15 cm	69,7	0,1	69,8
142	2015	6	2	Umbruch	15-20 cm	11,6	6,1	17,7	449	2016	26	4	Umbruch	15-20 cm	51,7	0,1	51,8
143	2015	6	2	Umbruch	20-25 cm	7,2	4,3	11,5	450	2016	26	4	Umbruch	20-25 cm	22,2	0,1	22,3
144	2015	6	3	Miscanthus	0-5 cm	28,4	28,3	56,7	452	2017	26	1	Miscanthus	0-5 cm	145,4	0,2	145,6
145	2015	6	3	Miscanthus	5-10 cm	5,2	19,7	24,8	453	2017	26	1	Miscanthus	5-10 cm	82,8	0,2	83,0
146	2015	6	3	Miscanthus	10-15 cm	5,8	7,7	13,4	454	2017	26	1	Miscanthus	10-15 cm	34,1	0,1	34,2
147	2015	6	3	Miscanthus	15-20 cm	11,2	4,7	15,8	455	2017	26	1	Miscanthus	15-20 cm	28,3	0,1	28,4
148	2015	6	3	Miscanthus	20-25 cm	8,8	4,8	13,5	456	2017	26	1	Miscanthus	20-25 cm	24,5	0,1	24,6
149	2015	6	3	Umbruch	0-5 cm	64,2	31,8	96,0	457	2017	26	1	Umbruch	0-5 cm	65,9	0,1	66,0
150	2015	6	3	Umbruch	5-10 cm	7,0	21,8	28,8	458	2017	26	1	Umbruch	5-10 cm	55,0	0,1	55,0
151	2015	6	3	Umbruch	10-15 cm	8,0	6,8	14,8	459	2017	26	1	Umbruch	10-15 cm	55,3	0,1	55,4

152	2015	6	3	Umbruch	15-20 cm	16,3	3,3	19,6	460	2017	26	1	Umbruch	15-20 cm	36,1	0,1	36,2
153	2015	6	3	Umbruch	20-25 cm	10,2	2,7	12,9	461	2017	26	1	Umbruch	20-25 cm	28,1	0,1	28,2
154	2015	6	4	Miscanthus	0-5 cm	123,2	0,9	124,2	462	2017	26	2	Miscanthus	0-5 cm	169,0	0,2	169,2
155	2015	6	4	Miscanthus	5-10 cm	23,9	10,3	34,2	463	2017	26	2	Miscanthus	5-10 cm	105,8	0,2	106,0
156	2015	6	4	Miscanthus	10-15 cm	17,6	2,5	20,1	464	2017	26	2	Miscanthus	10-15 cm	43,4	0,1	43,5
157	2015	6	4	Miscanthus	15-20 cm	18,1	2,0	20,1	465	2017	26	2	Miscanthus	15-20 cm	37,4	0,1	37,5
158	2015	6	4	Miscanthus	20-25 cm	25,2	1,1	26,2	466	2017	26	2	Miscanthus	20-25 cm	28,3	0,1	28,4
159	2015	6	4	Umbruch	0-5 cm	137,5	0,1	137,6	467	2017	26	2	Umbruch	0-5 cm	43,3	0,1	43,4
160	2015	6	4	Umbruch	5-10 cm	32,8	7,7	40,4	468	2017	26	2	Umbruch	5-10 cm	62,9	0,1	63,0
161	2015	6	4	Umbruch	10-15 cm	28,2	3,3	31,5	469	2017	26	2	Umbruch	10-15 cm	59,8	0,1	59,8
162	2015	6	4	Umbruch	15-20 cm	21,5	1,7	23,1	470	2017	26	2	Umbruch	15-20 cm	70,3	0,1	70,4
163	2015	6	4	Umbruch	20-25 cm	16,7	1,1	17,7	471	2017	26	2	Umbruch	20-25 cm	105,2	0,1	105,3
165	2016	6	1	Miscanthus	0-5 cm	126,1	2,4	128,5	472	2017	26	3	Miscanthus	0-5 cm	165,6	0,2	165,8
166	2016	6	1	Miscanthus	5-10 cm	1,8	12,2	14,0	473	2017	26	3	Miscanthus	5-10 cm	80,4	0,2	80,6
167	2016	6	1	Miscanthus	10-15 cm	0,5	7,4	7,9	474	2017	26	3	Miscanthus	10-15 cm	47,4	0,1	47,5
168	2016	6	1	Miscanthus	15-20 cm	1,2	5,5	6,7	475	2017	26	3	Miscanthus	15-20 cm	39,4	0,1	39,4
169	2016	6	1	Miscanthus	20-25 cm	0,6	4,8	5,4	476	2017	26	3	Miscanthus	20-25 cm	32,6	0,8	33,4
170	2016	6	1	Umbruch	0-5 cm	44,8	0,3	45,1	477	2017	26	3	Umbruch	0-5 cm	61,1	0,1	61,2
171	2016	6	1	Umbruch	5-10 cm	62,2	0,1	62,2	478	2017	26	3	Umbruch	5-10 cm	70,8	0,1	70,9
172	2016	6	1	Umbruch	10-15 cm	10,9	2,1	13,0	479	2017	26	3	Umbruch	10-15 cm	63,6	0,1	63,7
173	2016	6	1	Umbruch	15-20 cm	21,2	3,1	24,3	480	2017	26	3	Umbruch	15-20 cm	52,2	0,1	52,3
174	2016	6	1	Umbruch	20-25 cm	4,0	2,3	6,2	481	2017	26	3	Umbruch	20-25 cm	54,1	0,1	54,2
175	2016	6	2	Miscanthus	0-5 cm	108,8	0,2	109,0	482	2017	26	4	Miscanthus	0-5 cm	130,6	0,2	130,8
176	2016	6	2	Miscanthus	5-10 cm	14,5	9,8	24,3	483	2017	26	4	Miscanthus	5-10 cm	56,6	0,2	56,8
177	2016	6	2	Miscanthus	10-15 cm	2,2	6,2	8,4	484	2017	26	4	Miscanthus	10-15 cm	44,0	0,1	44,1
178	2016	6	2	Miscanthus	15-20 cm	2,0	4,5	6,6	485	2017	26	4	Miscanthus	15-20 cm	29,5	0,1	29,6
179	2016	6	2	Miscanthus	20-25 cm	1,4	5,7	7,2	486	2017	26	4	Miscanthus	20-25 cm	32,0	0,1	32,1
180	2016	6	2	Umbruch	0-5 cm	27,7	8,0	35,7	487	2017	26	4	Umbruch	0-5 cm	67,4	0,1	67,5
181	2016	6	2	Umbruch	5-10 cm	52,3	6,0	58,3	488	2017	26	4	Umbruch	5-10 cm	56,9	0,1	57,0
182	2016	6	2	Umbruch	10-15 cm	0,6	11,9	12,4	489	2017	26	4	Umbruch	10-15 cm	87,8	0,1	87,9
183	2016	6	2	Umbruch	15-20 cm	0,5	8,1	8,6	490	2017	26	4	Umbruch	15-20 cm	86,9	0,1	87,0
184	2016	6	2	Umbruch	20-25 cm	1,9	6,6	8,5	491	2017	26	4	Umbruch	20-25 cm	54,4	0,1	54,4
185	2016	6	3	Miscanthus	0-5 cm	118,4	0,2	118,6	493	2015	35	1	Miscanthus	0-5 cm	154,0	0,2	154,2
186	2016	6	3	Miscanthus	5-10 cm	17,4	19,2	36,6	494	2015	35	1	Miscanthus	5-10 cm	38,9	4,8	43,7
187	2016	6	3	Miscanthus	10-15 cm	2,5	7,8	10,3	495	2015	35	1	Miscanthus	10-15 cm	42,2	0,1	42,3
188	2016	6	3	Miscanthus	15-20 cm	0,5	5,5	6,0	496	2015	35	1	Miscanthus	15-20 cm	27,6	0,1	27,7
189	2016	6	3	Miscanthus	20-25 cm	2,3	3,7	6,0	497	2015	35	1	Miscanthus	20-25 cm	24,5	0,1	24,6
190	2016	6	3	Umbruch	0-5 cm	93,8	0,1	93,9	498	2015	35	1	Umbruch	0-5 cm	106,4	0,1	106,5
191	2016	6	3	Umbruch	5-10 cm	35,7	0,1	35,8	499	2015	35	1	Umbruch	5-10 cm	75,8	1,8	77,5
192	2016	6	3	Umbruch	10-15 cm	76,6	0,1	76,6	500	2015	35	1	Umbruch	10-15 cm	50,4	0,1	50,5
193	2016	6	3	Umbruch	15-20 cm	9,5	4,1	13,5	501	2015	35	1	Umbruch	15-20 cm	30,3	0,1	30,4
194	2016	6	3	Umbruch	20-25 cm	17,9	4,5	22,4	502	2015	35	1	Umbruch	20-25 cm	22,2	0,1	22,3
195	2016	6	4	Miscanthus	0-5 cm	40,0	12,7	52,6	503	2015	35	2	Miscanthus	0-5 cm	112,7	0,2	112,9
196	2016	6	4	Miscanthus	5-10 cm	12,4	14,1	26,5	504	2015	35	2	Miscanthus	5-10 cm	79,4	0,2	79,6
197	2016	6	4	Miscanthus	10-15 cm	16,3	3,1	19,4	505	2015	35	2	Miscanthus	10-15 cm	31,9	0,1	32,0
198	2016	6	4	Miscanthus	15-20 cm	3,2	4,9	8,1	506	2015	35	2	Miscanthus	15-20 cm	33,8	0,1	33,9
199	2016	6	4	Miscanthus	20-25 cm	10,1	3,1	13,2	507	2015	35	2	Miscanthus	20-25 cm	28,2	0,1	28,3
200	2016	6	4	Umbruch	0-5 cm	132,4	0,1	132,4	508	2015	35	2	Umbruch	0-5 cm	142,0	0,1	142,1

Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)	Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)
201	2016	6	4	Umbruch	5-10 cm	85,9	0,1	86,0	509	2015	35	2	Umbruch	5-10 cm	51,5	0,5	52,0
202	2016	6	4	Umbruch	10-15 cm	65,5	0,9	66,4	510	2015	35	2	Umbruch	10-15 cm	41,9	0,1	42,0
203	2016	6	4	Umbruch	15-20 cm	29,6	4,3	33,9	511	2015	35	2	Umbruch	15-20 cm	32,0	0,1	32,1
204	2016	6	4	Umbruch	20-25 cm	7,1	2,6	9,7	512	2015	35	2	Umbruch	20-25 cm	34,1	0,1	34,2
206	2017	6	1	Miscanthus	0-5 cm	125,9	0,2	126,1	513	2015	35	3	Miscanthus	0-5 cm	119,2	0,7	119,9
207	2017	6	1	Miscanthus	5-10 cm	24,1	12,7	36,8	514	2015	35	3	Miscanthus	5-10 cm	53,7	1,2	54,9
208	2017	6	1	Miscanthus	10-15 cm	20,6	2,9	23,5	515	2015	35	3	Miscanthus	10-15 cm	43,8	0,1	43,9
209	2017	6	1	Miscanthus	15-20 cm	8,0	1,3	9,3	516	2015	35	3	Miscanthus	15-20 cm	24,6	0,2	24,9
210	2017	6	1	Miscanthus	20-25 cm	15,4	1,4	16,8	517	2015	35	3	Miscanthus	20-25 cm	29,7	0,1	29,8
211	2017	6	1	Umbruch	0-5 cm	52,4	0,1	52,5	518	2015	35	3	Umbruch	0-5 cm	156,2	0,1	156,3
212	2017	6	1	Umbruch	5-10 cm	44,9	0,1	45,0	519	2015	35	3	Umbruch	5-10 cm	62,1	0,2	62,3
213	2017	6	1	Umbruch	10-15 cm	37,9	0,1	38,0	520	2015	35	3	Umbruch	10-15 cm	42,4	0,1	42,5
214	2017	6	1	Umbruch	15-20 cm	26,2	0,1	26,2	521	2015	35	3	Umbruch	15-20 cm	32,7	0,1	32,8
215	2017	6	1	Umbruch	20-25 cm	14,8	0,1	14,8	522	2015	35	3	Umbruch	20-25 cm	24,3	0,1	24,4
216	2017	6	2	Miscanthus	0-5 cm	84,4	21,3	105,7	523	2015	35	4	Miscanthus	0-5 cm	126,4	0,2	126,6
217	2017	6	2	Miscanthus	5-10 cm	14,0	28,1	42,1	524	2015	35	4	Miscanthus	5-10 cm	67,8	0,2	68,1
218	2017	6	2	Miscanthus	10-15 cm	8,3	7,8	16,0	525	2015	35	4	Miscanthus	10-15 cm	36,6	0,1	36,7
219	2017	6	2	Miscanthus	15-20 cm	7,8	6,0	13,8	526	2015	35	4	Miscanthus	15-20 cm	27,0	0,1	27,1
220	2017	6	2	Miscanthus	20-25 cm	0,8	3,5	4,3	527	2015	35	4	Miscanthus	20-25 cm	26,3	0,1	26,4
221	2017	6	2	Umbruch	0-5 cm	30,8	0,1	30,9	528	2015	35	4	Umbruch	0-5 cm	130,2	0,1	130,3
222	2017	6	2	Umbruch	5-10 cm	51,0	0,2	51,2	529	2015	35	4	Umbruch	5-10 cm	44,4	0,1	44,5
223	2017	6	2	Umbruch	10-15 cm	48,1	0,1	48,2	530	2015	35	4	Umbruch	10-15 cm	41,6	0,1	41,7
224	2017	6	2	Umbruch	15-20 cm	57,1	0,1	57,2	531	2015	35	4	Umbruch	15-20 cm	62,2	0,1	62,3
225	2017	6	2	Umbruch	20-25 cm	67,2	0,1	67,3	532	2015	35	4	Umbruch	20-25 cm	32,1	0,1	32,2
226	2017	6	3	Miscanthus	0-5 cm	141,7	0,7	142,4	534	2016	35	1	Miscanthus	0-5 cm	166,5	0,2	166,7
227	2017	6	3	Miscanthus	5-10 cm	2,5	19,4	21,9	535	2016	35	1	Miscanthus	5-10 cm	37,1	0,2	37,3
228	2017	6	3	Miscanthus	10-15 cm	5,4	9,8	15,2	536	2016	35	1	Miscanthus	10-15 cm	9,5	0,2	9,7
229	2017	6	3	Miscanthus	15-20 cm	3,0	8,6	11,6	537	2016	35	1	Miscanthus	15-20 cm	10,8	1,8	12,5
230	2017	6	3	Miscanthus	20-25 cm	1,1	6,8	7,9	538	2016	35	1	Miscanthus	20-25 cm	19,8	1,7	21,5
231	2017	6	3	Umbruch	0-5 cm	36,8	0,1	36,9	539	2016	35	1	Umbruch	0-5 cm	91,8	0,1	91,9
232	2017	6	3	Umbruch	5-10 cm	63,5	0,1	63,6	540	2016	35	1	Umbruch	5-10 cm	85,8	0,1	85,9
233	2017	6	3	Umbruch	10-15 cm	41,4	0,1	41,5	541	2016	35	1	Umbruch	10-15 cm	71,4	0,1	71,5
234	2017	6	3	Umbruch	15-20 cm	39,6	0,1	39,7	542	2016	35	1	Umbruch	15-20 cm	27,9	0,1	28,0
235	2017	6	3	Umbruch	20-25 cm	34,7	0,1	34,8	543	2016	35	1	Umbruch	20-25 cm	15,1	0,1	15,2
236	2017	6	4	Miscanthus	0-5 cm	112,4	0,2	112,6	544	2016	35	2	Miscanthus	0-5 cm	141,8	0,2	142,0
237	2017	6	4	Miscanthus	5-10 cm	15,2	9,8	25,0	545	2016	35	2	Miscanthus	5-10 cm	53,7	0,2	53,9
238	2017	6	4	Miscanthus	10-15 cm	21,2	1,5	22,8	546	2016	35	2	Miscanthus	10-15 cm	7,0	0,9	7,9
239	2017	6	4	Miscanthus	15-20 cm	18,2	0,5	18,7	547	2016	35	2	Miscanthus	15-20 cm	15,0	0,1	15,1
240	2017	6	4	Miscanthus	20-25 cm	9,8	1,4	11,2	548	2016	35	2	Miscanthus	20-25 cm	11,3	0,1	11,4
241	2017	6	4	Umbruch	0-5 cm	46,9	0,1	47,0	549	2016	35	2	Umbruch	0-5 cm	126,5	0,1	126,6
242	2017	6	4	Umbruch	5-10 cm	43,2	0,1	43,3	550	2016	35	2	Umbruch	5-10 cm	68,4	0,1	68,5
243	2017	6	4	Umbruch	10-15 cm	74,4	0,1	74,5	551	2016	35	2	Umbruch	10-15 cm	40,8	0,1	40,9
244	2017	6	4	Umbruch	15-20 cm	67,9	0,1	68,0	552	2016	35	2	Umbruch	15-20 cm	35,8	0,2	36,0
245	2017	6	4	Umbruch	20-25 cm	45,4	0,1	45,4	553	2016	35	2	Umbruch	20-25 cm	24,5	0,1	24,6
247	2015	15	1	Miscanthus	0-5 cm	147,1	0,9	148,0	554	2016	35	3	Miscanthus	0-5 cm	133,1	0,2	133,3
248	2015	15	1	Miscanthus	5-10 cm	13,6	18,2	31,8	555	2016	35	3	Miscanthus	5-10 cm	57,0	3,3	60,4
249	2015	15	1	Miscanthus	10-15 cm	25,4	4,2	29,6	556	2016	35	3	Miscanthus	10-15 cm	22,8	0,1	22,9
250	2015	15	1	Miscanthus	15-20 cm	28,2	2,4	30,5	557	2016	35	3	Miscanthus	15-20 cm	21,3	0,1	21,4
251	2015	15	1	Miscanthus	20-25 cm	17,5	0,9	18,4	558	2016	35	3	Miscanthus	20-25 cm	20,6	0,1	20,7
252	2015	15	1	Umbruch	0-5 cm	109,9	1,5	111,4	559	2016	35	3	Umbruch	0-5 cm	127,5	0,1	127,6
253	2015	15	1	Umbruch	5-10 cm	27,6	22,6	50,2	560	2016	35	3	Umbruch	5-10 cm	80,9	0,1	81,0
254	2015	15	1	Umbruch	10-15 cm	29,1	5,0	34,1	561	2016	35	3	Umbruch	10-15 cm	80,4	0,1	80,5
255	2015	15	1	Umbruch	15-20 cm	26,0	1,8	27,8	562	2016	35	3	Umbruch	15-20 cm	47,3	0,1	47,4

Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)	Echantillon	Année	Jour d'extraction	Répétition	Traitement	Profondeur	NO3-N	NH4-N	Nmin (µg/mg)
256	2015	15	1	Umbruch	20-25 cm	18,6	1,3	19,8	563	2016	35	3	Umbruch	20-25 cm	29,4	0,1	29,5
257	2015	15	2	Miscanthus	0-5 cm	90,4	0,2	90,6	564	2016	35	4	Miscanthus	0-5 cm	120,2	0,2	120,4
258	2015	15	2	Miscanthus	5-10 cm	14,1	13,2	27,3	565	2016	35	4	Miscanthus	5-10 cm	80,3	0,2	80,5
259	2015	15	2	Miscanthus	10-15 cm	22,8	1,9	24,6	566	2016	35	4	Miscanthus	10-15 cm	13,1	0,3	13,5
260	2015	15	2	Miscanthus	15-20 cm	27,6	4,8	32,3	567	2016	35	4	Miscanthus	15-20 cm	22,1	0,1	22,2
261	2015	15	2	Miscanthus	20-25 cm	18,0	1,9	19,8	568	2016	35	4	Miscanthus	20-25 cm	34,8	0,1	34,9
262	2015	15	2	Umbruch	0-5 cm	96,6	8,7	105,3	569	2016	35	4	Umbruch	0-5 cm	96,9	0,1	97,0
263	2015	15	2	Umbruch	5-10 cm	17,4	12,8	30,2	570	2016	35	4	Umbruch	5-10 cm	114,0	0,1	114,1
264	2015	15	2	Umbruch	10-15 cm	23,0	3,9	26,9	571	2016	35	4	Umbruch	10-15 cm	61,7	0,1	61,8
265	2015	15	2	Umbruch	15-20 cm	28,4	2,0	30,4	572	2016	35	4	Umbruch	15-20 cm	60,9	0,1	61,0
266	2015	15	2	Umbruch	20-25 cm	21,2	1,4	22,6	573	2016	35	4	Umbruch	20-25 cm	41,2	0,1	41,3
267	2015	15	3	Miscanthus	0-5 cm	95,2	0,2	95,4	575	2017	35	1	Miscanthus	0-5 cm	145,8	0,2	146,1
268	2015	15	3	Miscanthus	5-10 cm	14,1	12,0	26,1	576	2017	35	1	Miscanthus	5-10 cm	78,4	0,2	78,6
269	2015	15	3	Miscanthus	10-15 cm	20,8	2,5	23,3	577	2017	35	1	Miscanthus	10-15 cm	35,4	0,1	35,5
270	2015	15	3	Miscanthus	15-20 cm	24,8	0,9	25,7	578	2017	35	1	Miscanthus	15-20 cm	27,5	0,1	27,6
271	2015	15	3	Miscanthus	20-25 cm	14,4	2,0	16,4	579	2017	35	1	Miscanthus	20-25 cm	29,8	0,1	29,9
272	2015	15	3	Umbruch	0-5 cm	175,2	0,3	175,5	580	2017	35	1	Umbruch	0-5 cm	71,9	0,2	72,1
273	2015	15	3	Umbruch	5-10 cm	26,6	13,4	40,0	581	2017	35	1	Umbruch	5-10 cm	53,3	0,1	53,4
274	2015	15	3	Umbruch	10-15 cm	27,2	1,6	28,8	582	2017	35	1	Umbruch	10-15 cm	57,3	0,1	57,4
275	2015	15	3	Umbruch	15-20 cm	35,4	0,2	35,6	583	2017	35	1	Umbruch	15-20 cm	38,4	0,1	38,5
276	2015	15	3	Umbruch	20-25 cm	22,3	0,1	22,4	584	2017	35	1	Umbruch	20-25 cm	45,0	0,1	45,1
277	2015	15	4	Miscanthus	0-5 cm	101,5	0,2	101,7	585	2017	35	2	Miscanthus	0-5 cm	174,4	0,2	174,6
278	2015	15	4	Miscanthus	5-10 cm	44,6	0,2	44,8	586	2017	35	2	Miscanthus	5-10 cm	100,0	0,2	100,2
279	2015	15	4	Miscanthus	10-15 cm	34,4	0,1	34,5	587	2017	35	2	Miscanthus	10-15 cm	50,9	0,1	51,0
280	2015	15	4	Miscanthus	15-20 cm	36,7	0,1	36,8	588	2017	35	2	Miscanthus	15-20 cm	49,0	0,2	49,2
281	2015	15	4	Miscanthus	20-25 cm	25,6	0,1	25,7	589	2017	35	2	Miscanthus	20-25 cm	31,7	0,1	31,8
282	2015	15	4	Umbruch	0-5 cm	139,2	0,1	139,2	590	2017	35	2	Umbruch	0-5 cm	51,6	0,1	51,7
283	2015	15	4	Umbruch	5-10 cm	59,1	0,1	59,2	591	2017	35	2	Umbruch	5-10 cm	64,4	0,2	64,6
284	2015	15	4	Umbruch	10-15 cm	38,0	0,1	38,1	592	2017	35	2	Umbruch	10-15 cm	57,8	0,1	57,9
285	2015	15	4	Umbruch	15-20 cm	34,6	0,1	34,7	593	2017	35	2	Umbruch	15-20 cm	62,3	0,1	62,4
286	2015	15	4	Umbruch	20-25 cm	32,5	0,1	32,6	594	2017	35	2	Umbruch	20-25 cm	103,1	0,1	103,2
288	2016	15	1	Miscanthus	0-5 cm	128,6	0,2	128,8	595	2017	35	3	Miscanthus	0-5 cm	152,8	0,2	153,0
289	2016	15	1	Miscanthus	5-10 cm	43,9	0,2	44,1	596	2017	35	3	Miscanthus	5-10 cm	73,6	0,2	73,8
290	2016	15	1	Miscanthus	10-15 cm	1,8	3,8	5,6	597	2017	35	3	Miscanthus	10-15 cm	48,4	0,1	48,5
291	2016	15	1	Miscanthus	15-20 cm	10,4	1,6	12,0	598	2017	35	3	Miscanthus	15-20 cm	41,2	0,1	41,3
292	2016	15	1	Miscanthus	20-25 cm	7,5	1,8	9,3	599	2017	35	3	Miscanthus	20-25 cm	35,0	0,1	35,1
293	2016	15	1	Umbruch	0-5 cm	81,1	0,1	81,2	600	2017	35	3	Umbruch	0-5 cm	56,4	0,1	56,5
294	2016	15	1	Umbruch	5-10 cm	60,7	0,1	60,8	601	2017	35	3	Umbruch	5-10 cm	68,6	0,1	68,7
295	2016	15	1	Umbruch	10-15 cm	36,0	0,1	36,0	602	2017	35	3	Umbruch	10-15 cm	62,3	0,1	62,4
296	2016	15	1	Umbruch	15-20 cm	9,8	0,8	10,6	603	2017	35	3	Umbruch	15-20 cm	54,0	0,1	54,1
297	2016	15	1	Umbruch	20-25 cm	20,6	0,1	20,7	604	2017	35	3	Umbruch	20-25 cm	59,0	0,1	59,1
298	2016	15	2	Miscanthus	0-5 cm	95,5	0,2	95,7	605	2017	35	4	Miscanthus	0-5 cm	186,4	0,5	186,9
299	2016	15	2	Miscanthus	5-10 cm	13,2	2,1	15,3	606	2017	35	4	Miscanthus	5-10 cm	154,2	0,2	154,5
300	2016	15	2	Miscanthus	10-15 cm	0,1	5,1	5,2	607	2017	35	4	Miscanthus	10-15 cm	98,8	0,1	98,9
301	2016	15	2	Miscanthus	15-20 cm	7,8	1,3	9,0	608	2017	35	4	Miscanthus	15-20 cm	14,7	0,1	14,8
302	2016	15	2	Miscanthus	20-25 cm	3,4	2,1	5,6	609	2017	35	4	Miscanthus	20-25 cm	46,7	0,2	46,9
303	2016	15	2	Umbruch	0-5 cm	76,3	0,1	76,4	610	2017	35	4	Umbruch	0-5 cm	53,7	0,1	53,8
304	2016	15	2	Umbruch	5-10 cm	79,9	0,1	80,0	611	2017	35	4	Umbruch	5-10 cm	72,9	0,1	73,0
305	2016	15	2	Umbruch	10-15 cm	35,1	0,2	35,3	612	2017	35	4	Umbruch	10-15 cm	106,6	0,1	106,7
306	2016	15	2	Umbruch	15-20 cm	0,1	8,2	8,3	613	2017	35	4	Umbruch	15-20 cm	95,8	0,1	95,9
307	2016	15	2	Umbruch	20-25 cm	0,2	5,8	6,0	614	2017	35	4	Umbruch	20-25 cm	115,6	0,1	115,7

ANNEXE 5 : Test et résultats statistiques pour le suivi de minéralisation

• MISCANTHUS 2015 : différences entre profondeurs

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,382)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,160)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
0-5	4	0	128,416	18,084	9,042
5-10	4	0	61,552	15,599	7,799
10-15	4	0	38,722	5,440	2,720
15-20	4	0	25,768	7,121	3,561
20-25	4	0	27,298	2,267	1,134

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	4	29242,435	7310,609	55,737	<0,001
Residual	15	1967,427	131,162		
Total	19	31209,862			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=<0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
0-5 vs 15-20	102,648	5	17,926	<0,001	Yes
0-5 vs. 20-25	101,118	4	17,659	<0,001	Yes
0-5 vs. 10-15	89,694	3	15,663	<0,001	Yes
0-5 vs. 5-10	66,864	2	11,677	<0,001	Yes
5-10 vs. 15-20	35,784	4	6,249	0,003	Yes
5-10 vs. 20-25	34,254	3	5,982	0,002	Yes
5-10 vs. 10-15	22,830	2	3,987	0,013	Yes
10-15 vs. 15-20	12,954	3	2,262	0,276	No
10-15 vs. 20-25	11,425	2	1,995	0,179	Do Not Test
20-25 vs. 15-20	1,530	2	0,267	0,853	Do Not Test

• MISCANTHUS 2016 : différences entre profondeurs

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,288)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,320)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
0-5	4	0	140,596	19,533	9,767
5-10	4	0	58,036	17,864	8,932
10-15	4	0	13,507	6,697	3,349
15-20	4	0	17,816	4,730	2,365
20-25	4	0	22,121	9,691	4,846

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	4	45664,514	11416,129	66,233	<0,001
Residual	15	2585,461	172,364		
Total	19	48249,975			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=<0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
0-5 vs 15-20	127,089	5	19,360	<0,001	Yes
0-5 vs. 20-25	122,780	4	18,704	<0,001	Yes
0-5 vs. 10-15	118,475	3	18,048	<0,001	Yes
0-5 vs. 5-10	82,560	2	12,577	<0,001	Yes
5-10 vs. 10-15	44,529	4	6,783	0,001	Yes
5-10 vs. 15-20	40,220	3	6,127	0,002	Yes
5-10 vs. 20-25	35,915	2	5,471	0,012	Yes
20-25 vs. 10-15	8,614	3	1,312	0,632	No
20-25 vs. 15-20	4,305	2	0,656	0,650	Do Not Test
15-20 vs. 10-15	4,308	2	0,656	0,649	Do Not Test

• MISCANTHUS 2017 : différences entre profondeurs

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,105)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,521)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
0-5	4	0	165,136	18,908	9,454
5-10	4	0	101,776	36,949	18,475

10-15	4	0	58,486	27,781	13,890	
15-20	4	0	33,226	15,195	7,598	
20-25	4	0	35,926	7,643	3,821	
Source of Variation	DF	SS	MS	F	P	
Between Groups	4	49238,276	12309,569	22,109	<0,001	
Residual	15	8351,514	556,768			
Total	19	57589,790				

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference ($P < 0,001$).

Power of performed test with $\alpha = 0,050$: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
0-5 vs 15-20	131,910	5	11,181	<0,001	Yes
0-5 vs. 20-25	129,210	4	10,952	<0,001	Yes
0-5 vs. 10-15	106,650	3	9,040	<0,001	Yes
0-5 vs. 5-10	63,360	2	5,370	0,002	Yes
5-10 vs. 15-20	68,550	4	5,810	0,005	Yes
5-10 vs. 20-25	65,850	3	5,581	0,004	Yes
5-10 vs. 10-15	43,290	2	3,669	0,020	Yes
10-25 vs. 15-20	25,260	3	2,141	0,313	No
10-25 vs. 20-25	22,560	2	1,912	0,197	Do Not Test
20-25 vs. 15-20	2,700	2	0,229	0,874	Do Not Test

• UMBRUCH 2015 : différences entre profondeurs

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,310)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,336)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
0-5	4	0	133,786	21,078	10,539
5-10	4	0	59,086	14,294	7,147
10-15	4	0	44,176	4,254	2,127
15-20	4	0	39,387	15,334	7,667
20-25	4	0	28,276	5,802	2,901

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	4	28489,971	7122,493	38,069	<0,001
Residual	15	2806,447	187,096		
Total	19	31296,418			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference ($P < 0,001$).

Power of performed test with $\alpha = 0,050$: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
0-5 vs 20-25	105,510	5	15,427	<0,001	Yes
0-5 vs. 15-20	94,399	4	13,803	<0,001	Yes
0-5 vs. 10-15	89,610	3	13,102	<0,001	Yes
0-5 vs. 5-10	74,700	2	10,922	<0,001	Yes
5-10 vs. 20-25	30,810	4	4,505	0,028	Yes
5-10 vs. 15-20	19,699	3	2,880	0,138	No
5-10 vs. 10-15	14,910	2	2,180	0,144	Do Not Test
10-15 vs. 20-25	15,900	3	2,325	0,259	No
10-15 vs. 15-20	4,789	2	0,700	0,628	Do Not Test
15-20 vs. 20-25	11,111	2	1,625	0,269	Do Not Test

• UMBRUCH 2016 : différences entre profondeurs

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,463)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,302)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
0-5	4	0	110,788	18,950	9,475
5-10	4	0	87,406	19,266	9,633
10-15	4	0	78,531	38,450	19,225
15-20	4	0	43,096	14,342	7,171
20-25	4	0	27,660	10,866	5,433

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	4	18218,570	4554,642	8,993	<0,001
Residual	15	7597,346	506,490		
Total	19	25815,916			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference ($P < 0,001$).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,986

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
0-5 vs 20-25	83,128	5	15,427	<0,001	Yes
0-5 vs. 15-20	67,692	4	13,803	0,004	Yes
0-5 vs. 10-15	32,257	3	13,102	0,140	No
0-5 vs. 5-10	23,382	2	10,922	0,163	Do Not Test
5-10 vs. 20-25	59,746	4	4,505	0,009	Yes
5-10 vs. 15-20	44,310	3	2,880	0,035	Yes
5-10 vs. 10-15	8,875	2	2,180	0,585	Do Not Test
10-15 vs. 20-25	50,871	3	2,325	0,016	Yes
10-15 vs. 15-20	35,435	2	0,700	0,042	Yes
15-20 vs. 20-25	15,436	2	1,625	0,348	No

• **UMBRUCH 2017 : différences entre profondeurs**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,050)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,428)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
0-5	4	0	58,546	9,271	4,636
5-10	4	0	64,906	8,393	4,196
10-15	4	0	71,086	23,848	11,924
15-20	4	0	86,716	70,736	35,368
20-25	4	0	80,776	33,985	16,992

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	4	2099,700	524,925	0,381	0,819
Residual	15	20651,202	1376,747		
Total	19	22750,902			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,059).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050

The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **MISCANTHUS 0-5cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,139)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,895)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Mis 0-5 2015	4	0	128,416	18,084	9,042
Mis 0-5 2016	4	0	140,596	19,533	9,767
Mis 0-5 2017	4	0	165,136	18,908	9,454

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	2798,563	1399,282	3,927	0,059
Residual	9	3198,341	355,371		
Total	11	5996,904			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,059).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,427

The power of the performed test (0,427) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **MISCANTHUS 5-10cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,343)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,472)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Mis 5-10 2015	4	0	61,552	15,599	7,799
Mis 5-10 2016	4	0	58,036	17,864	8,932
Mis 5-10 2017	4	0	101,776	36,949	18,475

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	4724,693	2362,347	3,676	0,068
Residual	9	5783,102	642,567		
Total	11	10507,795			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,068).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,393

The power of the performed test (0,393) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **MISCANTHUS 10-15cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,050)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,385)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Mis 10-15 2015	4	0	38,722	5,440	2,720
Mis 10-15 2016	4	0	13,507	6,697	3,349
Mis 10-15 2017	4	0	58,486	27,781	13,890

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	4065,978	2032,989	7,207	0,014
Residual	9	2538,604	282,067		
Total	11	6604,583			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=0,014).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,762

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
Mis 10-15 2017 vs. Mis 10-15 2016	44,979	3	5,536	0,011	Yes
Mis 10-15 2017 vs. Mis 10-15 2017	19,764	2	2,354	0,131	No
Mis 10-15 2016 vs. Mis 10-15 2015	25,215	2	3,003	0,063	No

• **MISCANTHUS 15-20cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,996)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,061)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Mis 15-20 2015	4	0	25,768	7,121	3,561
Mis 15-20 2016	4	0	17,816	4,730	2,365
Mis 15-20 2017	4	0	33,226	15,195	7,598

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	475,119	237,559	2,345	0,152
Residual	9	911,931	101,326		
Total	11	1387,050			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,152).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,214

The power of the performed test (0,214) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **MISCANTHUS 20-25cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,239)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,491)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Mis 20-25 2015	4	0	27,298	2,267	1,134
Mis 20-25 2016	4	0	22,121	9,691	4,846
Mis 20-25 2017	4	0	35,926	7,643	3,821

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	389,091	194,546	3,706	0,067
Residual	9	472,424	52,492		
Total	11	861,515			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,067).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,397

The power of the performed test (0,397) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **UMBRUCH 0-5cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,752)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,185)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
U 0-5 2015	4	0	133,786	21,078	10,539
U 0-5 2016	4	0	110,788	18,950	9,475
U 0-5 2017	4	0	58,546	9,271	4,636

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	11892,226	5946,113	20,059	<0,001
Residual	9	2667,896	296,433		
Total	11	14560,122			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P<0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,998

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
U 0-5 2015 vs. U 0-5 2017	75,240	3	8,740	<0,001	Yes
U 0-5 2015 vs. U 0-5 2016	22,998	2	2,672	0,092	No
U 0-5 2016 vs. U 0-5 2017	52,242	2	6,069	0,002	Yes

• **UMBRUCH 5-10cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,810)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,591)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
U 5-10 2015	4	0	59,086	14,294	7,147
U 5-10 2016	4	0	87,406	19,266	9,633
U 5-10 2017	4	0	64,906	8,393	4,196

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	1789,526	894,763	4,156	0,053
Residual	9	1937,840	215,316		
Total	11	3727,367			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,053).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,455

The power of the performed test (0,455) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **UMBRUCH 10-15cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,132)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,230)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
U 10-15 2015	4	0	44,176	4,254	2,127
U 10-15 2016	4	0	78,531	38,450	19,225
U 10-15 2017	4	0	71,086	23,848	11,924

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	2613,105	1306,552	1,898	0,205
Residual	9	6195,739	688,415		
Total	11	8808,844			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,205).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,156

The power of the performed test (0,156) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

• **UMBRUCH 15-20cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,050)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,435)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
U 15-20 2015	4	0	38,387	15,334	7,667
U 15-20 2016	4	0	43,096	14,342	7,171

U 15-20 2017 4 0 86,176 70,736 35,368

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	5542,042	2771,021	1,527	0,269
Residual	9	16333,382	1814,820		
Total	11	21875,424			

The difference in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P=0,269).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,110

The power of the performed test (0,110) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists.

Negative results should be interpreted cautiously.

- **UMBRUCH 20-25cm : différences entre années**

One Way Analysis of Variance

Normality Test: Passed (P = 0,998)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,050)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
U 20-25 2015	4	0	28,276	5,802	2,901
U 20-25 2016	4	0	27,660	10,866	5,433
U 20-25 2017	4	0	80,776	33,985	16,992

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	7437,317	3718,658	8,537	0,008
Residual	9	3920,137	435,571		
Total	11	11357,454			

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=0,008).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,844

All Pairwise Multiple Comparison Procedure (Student-Newman-Keuls Methods):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
U 20-25 2017 vs. U 20-25 2016	53,116	3	5,090	0,014	Yes
U 20-25 2017 vs. U 20-25 2015	52,500	2	5,031	0,006	Yes
U 20-25 2015 vs. U 20-25 2016	0,616	2	0,0591	0,968	No

- **Comparaison M/U Nmin cumulé 2017**

t-test

Normality Test (Shapiro-Wilk): Passed (P = 0,134)

Equal Variance Test (Brown-Forsythe): Passed (P = 0,875)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
M2017	4	0	394,550	80,459	40,230
U2017	4	0	338,060	77,336	38,668

Difference 56,490

t = 1,012 with 6 degrees of freedom. 95 percent two-tailed confidence interval for difference of means: -80,048 to 193,028

Two-tailed P-value = 0,350

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,350).

- **Comparaison M/U 2015 : 0-5cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,833)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,712)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	128,416	18,084	9,042
Umbruch	4	0	133,786	21,078	10,539

Difference -5,370

t = -0,387 with 6 degrees of freedom. (P = 0,712)

95 percent confidence interval for difference of means: -39,348 to 26,608

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,712).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050

The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2016 : 0-5cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,355)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,687)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
------------	---	---------	------	---------	-----

Miscanthus	4	0	140,596	19,533	9,767
Umbruch	4	0	110,788	18,950	9,475

Difference 29,808

t = 2,191 with 6 degrees of freedom. (P = 0,071)

95 percent confidence interval for difference of means: -3,488 to 63,104

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,071).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,368

The power of the performed test (0,368) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2017 : 0-5cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,854)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,087)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	165,136	18,908	9,454
Umbruch	4	0	58,546	9,271	9,636

Difference 106,590

t = 10,123 with 6 degrees of freedom. (P = <0,001)

95 percent confidence interval for difference of means: 80,825 to 132,355

The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P<0,001). Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

- **Comparaison M/U 2015 : 5-10cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,451)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,779)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	61,552	15,599	7,799
Umbruch	4	0	59,086	14,294	7,147

Difference 2,466

t = 0,233 with 6 degrees of freedom. (P = 0,823)

95 percent confidence interval for difference of means: -23,420 to 28,352

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,823).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050. The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2016 : 5-10cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,370)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,981)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	58,036	17,864	8,932
Umbruch	4	0	87,406	19,266	9,633

Difference -29,370

t = -2,236 with 6 degrees of freedom. (P = 0,067)

95 percent confidence interval for difference of means: -61,515 to 2,775

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,067).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,384

The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800.

Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2017 : 5-10cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,171)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,195)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	101,776	36,949	18,475
Umbruch	4	0	64,906	8,393	4,196

Difference 36,870

t = 1,946 with 6 degrees of freedom. (P = 0,100)

95 percent confidence interval for difference of means: -9,487 to 83,227

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,100).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,283. The power of the performed test (0,283) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2015 : 10-15cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,320)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,409)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	38,722	5,440	2,720
Umbruch	4	0	44,176	4,254	2,127
Difference			-5,454		

t = -1,580 with 6 degrees of freedom. (P = 0,165)

95 percent confidence interval for difference of means: -13,903 to 2,995

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,165).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,172. The power of the performed test (0,172) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2016 : 10-15cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,719)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,209)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	13,507	6,697	3,349
Umbruch	4	0	63,701	16,997	8,498
Difference			-50,194		

t = -5,495 with 6 degrees of freedom. (P = 0,002)

95 percent confidence interval for difference of means: -72,545 to -27,843. The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=0,002). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,995.

- **Comparaison M/U 2017 : 10-15cm**

t-test

Normality Test: Failed (P<0,050)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,856)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	58,486	27,781	13,890
Umbruch	4	0	71,086	23,848	11,924
Difference			-12,600		

t = -0,688 with 6 degrees of freedom. (P = 0,517)

95 percent confidence interval for difference of means: -57,394 to 32,194

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,517).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050. The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2015 : 15-20cm**

t-test

Normality Test: Passed (P=0,063)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,689)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	25,768	7,121	3,561
Umbruch	4	0	39,387	15,334	7,667
Difference			-13,619		

t = -1,611 with 6 degrees of freedom. (P = 0,158)

95 percent confidence interval for difference of means: -34,304 to 7,067. The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,158). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,181. The power of the performed test (0,181) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2016 : 15-20cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,812)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,079)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
------------	---	---------	------	---------	-----

Miscanthus	4	0	17,816	4,730	2,365
Umbruch	4	0	43,096	14,342	7,171
Difference			-25,280		

t = -3,348 with 6 degrees of freedom. (P = 0,015)

95 percent confidence interval for difference of means: -43,757 to -6,804. The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=0,015). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,766.

- **Comparaison M/U 2017 : 15-20cm**

t-test

Normality Test: Passed (P=0,913)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,628)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	33,226	15,195	7,598
Umbruch	4	0	62,746	24,216	12,108
Difference			-29,520		

t = -2,065 with 6 degrees of freedom. (P = 0,084)

95 percent confidence interval for difference of means: -64,497 to 5,457. The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,084). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,324. The power of the performed test (0,324) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2015 : 20-25cm**

t-test

Normality Test: Passed (P=0,958)

Equal Variance Test: Failed (P < 0,050)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	27,298	2,267	1,134
Umbruch	4	0	28,276	5,802	2,901
Difference			-0,978		

t = -0,314 with 6 degrees of freedom. (P = 0,764)

95 percent confidence interval for difference of means: -8,600 to 6,643

The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,764).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050. The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2016 : 20-25cm**

t-test

Normality Test: Passed (P=0,406)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,730)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	22,121	9,691	4,846
Umbruch	4	0	27,660	10,866	5,433
Difference			-5,538		

t = -2,065 with 6 degrees of freedom. (P = 0,0476)

95 percent confidence interval for difference of means: -23,352 to 12,275. The difference in the mean values of the two groups is not great enough to reject the possibility that the difference is due to random sampling variability. There is not a statistically significant difference between the input groups (P = 0,476). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,050. The power of the performed test (0,050) is below the desired power of 0,800. Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

- **Comparaison M/U 2017 : 20-25cm**

t-test

Normality Test: Passed (P = 0,977)

Equal Variance Test: Passed (P < 0,050)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Miscanthus	4	0	35,926	7,643	3,821
Umbruch	4	0	80,776	33,985	16,992
Difference			-44,850		

t = -2,575 with 6 degrees of freedom. (P = 0,042)

95 percent confidence interval for difference of means: -87,467 to -2,233. The difference in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P=0,042). Power of performed test with alpha = 0,050: 0,509

ANNEXE 6 : Résultats complets pour le calcul de l'INN

Date	Parcelle	Biomasse t MS/ha	% N	% N critique	INN
22 mai 2017	V2/1	6,74	0,95	2,30	0,41
	V2/2	7,21	1,00	2,23	0,45
	V2/3	4,93	0,85	2,64	0,32
	V2/4	7,54	0,85	2,19	0,39
	ÖKO: parcelle de comparaison	3,21	1,00	3,20	0,31
7 juin 2017	V2/1	9,03	1,55	2,02	0,77
	V2/2	11,23	1,46	1,84	0,79
	V2/3	7,92	1,38	2,14	0,64
	V2/4	11,72	1,37	1,80	0,76
	ÖKO	3,96	1,44	2,91	0,49
4 juillet 2017	V2/1	11,05	1,07	1,85	0,58
	V2/2	13,55	0,83	1,69	0,49
	V2/3	11,30	0,94	1,83	0,51
	V2/4	12,74	0,91	1,74	0,53
	ÖKO	6,93	1,03	2,27	0,45



VetAgro Sup

PETIT Lucie, 2017, Remise en culture d'une parcelle de miscanthus en agriculture biologique : acquisition de références, 121 pages, mémoire de fin d'études, VetAgro-Sup Lempdes, 2017.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ)
- Universität Hohenheim

ENCADRANTS :

- Maître de stage : RECKNAGEL, Jürgen (LTZ)
- Tuteur pédagogique : VASSAL, Nathalie

OPTION : Agronomie, Productions Végétales et Environnement

Résumé

Suite à la destruction du Miscanthus, graminée pérenne, des questions sur ses arrières effets se posent. Cette étude s'inscrit dans un contexte particulier de remise en cultures annuelles d'une parcelle de Miscanthus en agriculture biologique avec pour problématique : **Comment évolue la matière organique dans le sol suite à la destruction d'une culture de Miscanthus âgée de 20 ans et à la remise en culture annuelles en agriculture biologique ? Quels sont les arrières effets agronomiques de cette culture dans une succession culturale conduite en agriculture biologique ?**

Ce travail s'appuie sur un dispositif expérimental, situé en Baden-Württemberg, basé sur un système de grandes cultures en agriculture biologique caractéristique de la région. Un protocole de suivi pluriannuel a été mis en place afin de suivre l'évolution de différents paramètres.

Du fait de restitutions de matière organique importantes sous Miscanthus, une augmentation de la teneur en matière organique du sol est observée chaque année en surface, induisant un potentiel de minéralisation de l'azote constant et plus élevé. Le risque de lessivage des nitrates est faible sous Miscanthus. Les effets bénéfiques du Miscanthus semblent ne pas perdurer au-delà de la première année suivant la remise en culture avec une diminution de la teneur en matière organique. Le travail du sol induit une redistribution de la MO sur l'horizon favorisant la minéralisation de l'azote plus en profondeur. Les éléments nutritifs libérés ne semblent pas répondre aux besoins des cultures en place. Enfin, le risque de lessivage des nitrates est beaucoup plus important.

Mots clés : Miscanthus, agriculture biologique, matière organique, dégradation, azote, carbone, succession culturale, remise en culture

Cote documentation VetAgro Sup :