

Potentiel d'utilisation de coupes d'herbe de prairie temporaire pour la fumure en système de grandes cultures biologiques sans bétail



Mémoire de Diplôme réalisé dans le cadre de la formation en écologie et sciences de l'environnement ECOFOC

Par : David FRUND

Sous la direction de : Gaëlle SERQUET

Sous l'expertise de : Josy TARAMARCAZ

La Chaux-de-Fonds, avril 2016

Table des matières

REMERCIEMENTS	4
LISTE DES ABREVIATIONS	5
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTE DES FIGURES	7
RESUME	9
1. Introduction	10
2. Problématique et contexte de l'étude	11
2.1. La problématique.....	11
2.2. Cadre légal.....	11
2.3. Contexte général.....	11
2.4. Contexte de l'essai	12
3. Questions de recherche.....	13
4. Etat des connaissances	13
4.1. Dynamique de l'azote organique.....	13
4.2. Rapport C/N des végétaux	14
4.3. La prairie temporaire dans la rotation	15
4.4. Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par les légumineuses	15
4.5. Restitution azotée des prairies temporaires	16
4.6. Mulch des prairies.....	16
4.7. Fertilisation de cultures avec de l'herbe	17
5. Méthodologie de l'essai maïs 2015.....	19
5.1. Description du site	19
5.2. Dispositif.....	19
5.3. Fertilisants	20
5.4. Récolte de l'herbe	21
5.5. Origine du compost.....	22
5.6. Epannage et incorporation des fertilisants	22
5.7. Semis et itinéraire cultural	23
5.8. Prélèvements de sol.....	23
5.9. Récolte du maïs	24
6. Résultats	24
6.1. Evolution du dispositif expérimental	24
6.2. Maïs grain.....	25
6.3. Maïs plante entière.....	26
6.4. Rapport maïs grain sur maïs plante entière	27
6.5. Nombre de tiges et d'épis par procédé.....	28
7. Discussion	29

7.1. Effet de l'année	30
7.2. Fourniture d'azote de la parcelle	31
7.2.1. Disponibilité de l'azote du sol	31
7.2.2. Minéralisation potentielle de l'humus	32
7.3. Effet fertilisant des engrais organiques	33
7.3.1. Conditions de minéralisation des engrais organiques	33
7.3.2. Cinétique de minéralisation des engrais organiques	34
Herbe et résidus végétaux.....	34
Farine de plumes	35
Fumier de poules séché.....	35
7.4. Cinétique de minéralisation des engrais et rendement	36
7.4.1. Herbe et farine de plumes	36
7.4.2. Fumier de poules	38
7.4.3. Rendement grain et rendement maïs plante entière	38
7.5. Comparaison des résultats avec d'autres essais	39
7.6. Synthèse	41
7.7. Pistes d'exploration	42
7.8. Procédés compost	44
8. Technicité de la méthode	44
8.1. Récolte et épandage de l'herbe	44
8.2. Adaptation de la technique	45
8.3. Main d'œuvre	46
8.4. Rapport surface d'herbe récoltée et surface de culture	46
8.5. Synthèse	46
9. Coût financier de la méthode	46
9.1. Coûts des engrais organiques	47
9.2. Coûts machines et main-d'œuvre	48
9.3. Synthèse	48
10. L'herbe fertilisante face à la tradition	49
11. Conclusions	50
12. Bibliographie	52

Photos couverture en haut à droite : Benoît Ferrand

Photos couverture autres : David Frund

REMERCIEMENTS

Pour réaliser ce travail j'ai bénéficié de nombreuses aides, aussi bien manuelles qu'intellectuelles. Aussi, afin de n'oublier personne, je tiens d'emblée à remercier très sincèrement tout un chacun, qui de près ou de loin a contribué à ce résultat.

Nommément je remercie :

Gaëlle Serquet qui m'a épaulé et guidé sur le chemin rédactionnel

Josy Tamarcaz qui m'a largement conseillé et qui m'a permis d'approfondir ce sujet innovant et passionnant avec une grande ouverture d'esprit

Bertrand Favre qui a accueilli avec bienveillance et intérêt l'essai sur son domaine

Marco Meisser pour ses conseils scientifiques très avisés

Serge Amiguet pour sa disponibilité, sa générosité et ses nombreuses explications

Luc Stévenin collègue aguerri prêt à de nouvelles aventures, même si c'est du maïs

Pierre Pignon pour la quantification des biomasses et ses instructions averties

Séverine Lorrain et Benoît Ferrand pour leur collaboration ponctuelle et appréciée

Raphaël Charles, Sokrat Sinaj et Aurèle Jobin pour leurs conseils instruits

Robert Frund pour son soutien indéfectible et son aide

Céline Corradetti pour son aide, sa patience et sa compréhension à toute épreuve

Mes remerciements pour leurs contributions financières ou pratiques à :

La ferme pilote de Mapraz (COOP)

Domaine de Miolan

Bio Suisse

Agroscope

Sol-Conseil

AGRIDEA

LISTE DES ABREVIATIONS

ADCF	: Association pour le Développement de la Culture Fourragère
BBCH	: Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt et Chemische Industrie (Allemagne)
COMIFER	: Comité français d'étude et de développement de la Fertilisation Raisonnée
C/N	: Rapport carbone sur azote
dt	: Décitonne
DBF-GCH	: Données de Base pour la Fumure des Grandes Cultures et des Herbages
EOC	: Engrais Organique du Commerce
ha	: Hectare
K	: Potasse
kg/t	: Kilogramme par tonne
MF	: Matière fraîche
Mh	: Minéralisation de l'humus de base
MPE	: Maïs plante entière
MrCi	: Minéralisation nette des résidus de cultures intermédiaires
MS	: Matières sèche
N	: Azote
NH ₄ -N	: Azote ammoniacal
N _{min}	: Azote minéral
N _{tot}	: Azote total
N ₂	: Azote atmosphérique
P	: Phosphore
QNabs	: Quantité azote absorbé
RSH	: Reliquat Sortie d'Hiver
RSH+L	: RSH + Pertes par lixiviation du nitrate pendant l'ouverture du bilan

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dénomination des procédés, des quantités d'azote épandues et composition des fertilisants.	20
Tableau 2 : Description et résultats d'analyse des produits fertilisants utilisés.	21
Tableau 3 : Données pour le calcul de la minéralisation de l'humus de base (Mh).	33
Tableau 4 : Taux de minéralisation potentiel durant la culture des engrais utilisés dans l'essai selon références des figures 19 à 21.	36
Tableau 5 : Mise en parallèle des rendements avec les kg d'azote potentiellement minéralisé provenant de la fertilisation et la minéralisation théorique de l'humus de base.	37
Tableau 6 : Quantité en kg par hectare, des différents éléments constituant les engrais épandus sur l'essai pour une fertilisation de base correspondant à un apport d'azote de 110 kg/ha.	47
Tableau 7 : Récapitulatif chiffré des coûts de fertilisation des différents engrais en francs par hectare fertilisé et du nombre d'heures nécessaires pour la mise en place de la fertilisation.	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cinétique de minéralisation de l'azote des résidus végétaux selon Justes et al. (2009) et adapté par Arvalis.....	14
Figure 2 : Taux de minéralisation de résidus végétaux. Chambre Régionale de Poitou-Charentes par Véricel et Minette (2010).....	15
Figure 3 : Plan de situation de la parcelle à Vandoeuvres et de la station météo de référence à Lullier.....	19
Figure 4 : Plan de répartition des procédés et des répétitions au début de l'essai.	20
Figure 5 : Mst 323 à la récolte.....	21
Figure 6 : Récolte de l'herbe.....	21
Figure 7 : Herbe épandue et longueur de hachage des brins.....	22
Figure 8 : Epandage de l'herbe (Photo : Benoît Ferrand).....	22
Figure 9 : Epandage des EOC à la main (Photo : Benoît Ferrand).....	23
Figure 10 : Essai après l'incorporation des engrais organiques.....	23
Figure 11 : Influence de la haie sur le dispositif.....	25
Figure 12 : Procédés restants après suppression des procédés impactés par la sécheresse ainsi que la suppression des procédés Compost de la répétition I.	25
Figure 13 : Rendement du maïs grain ramené à 14% d'humidité en dt/ha.....	26
Figure 14 : Rendement maïs plante entière (MPE) en dt de matière sèche par ha.....	27
Figure 15 : Corrélations des 2 courbes de rendement maïs grain et maïs plante entière.....	28
Figure 16 : Rapport maïs grain sur maïs plante entière détaillé.....	28
Figure 17 : Rapport de proportion entre épis et tiges.....	29
Figure 18 : Comparaison de la pluviométrie et de l'évapotranspiration 2015 en regard à la pluviométrie moyenne et l'évapotranspiration moyenne 2006-2014, par décennie.....	30
Figure 19 : Le focus est ici sur la courbe rouge qui montre la cinétique de minéralisation de résidus de ray-grass anglais (RGA) associé (ASS) à du trèfle blanc (Tb), sans apport d'azote (0N) (+N = avec azote). Adapté de Vertès et al. (2007) dans Vertès et al. (2015).....	35
Figure 20 : Cinétique de minéralisation de l'azote et taux de minéralisation de l'azote d'engrais à base de farine de plumes (David, 2004).....	35
Figure 21 : Cinétique de minéralisation du fumier de volailles (Bouthier et Trochard, 2009).....	36
Figure 22 : Courbe d'absorption azotée d'un maïs fourrage (Soënen et Bouthier, 2015).....	37
Figure 23 : Coefficient de l'utilisation de l'azote pour les essais maïs. Cela correspond à la part de rendement qui diffère du témoin, divisée par l'apport d'azote potentiellement minéralisé durant la culture.....	40

- Figure 24 : Coefficient de l'utilisation de l'azote pour les essais céleri. Ce qui correspond à la part de rendement qui diffère du témoin, divisée par l'apport d'azote potentiellement minéralisé durant la culture. 41
- Figure 25 : Coûts de mécanisation additionnés des coûts de main d'œuvre en rose. Coûts bruts des différents engrais organiques utilisés en bleu foncé. Le bleu clair correspond aux coûts de l'engrais après avoir déduit la valeur financière du phosphore (P) et de la potasse (K). 48

RESUME

Frund D. Potentiel d'utilisation de coupes d'herbe de prairie temporaire pour la fumure en système de grandes cultures biologiques sans bétail

L'autonomie azotée des cycles culturaux préoccupe l'agriculture biologique et la fertilisation à base d'herbe s'avère une alternative. Plusieurs expérimentations ont déjà été faites ou sont en cours à ce sujet. Cette étude compare l'utilisation d'une coupe d'herbe de prairie temporaire comme fertilisant à des engrais organiques du commerce du point de vue du rendement, de la praticabilité technique du système et des coûts financiers. La part de minéralisation potentielle de l'azote contenu dans l'herbe qui est disponible pour la culture la première année après l'apport est relativement faible. Alors que pour les engrais organiques à base de farine de plumes ce taux de minéralisation potentielle peut aller jusqu'au double de celui de l'herbe. Ce qui induit de doubler l'apport d'azote organique total sous forme d'herbe en première année pour un rendement annuel similaire à celui obtenu avec un engrais organique à base de farine de plumes. Toutefois l'arrière-effet du reste de la minéralisation de l'azote de l'herbe qui s'exprime en deuxième année est important et doit être pris en compte. Soulevant l'importance de considérer ce procédé sous un angle pluriannuel. La récolte et l'épandage de l'herbe comme fertilisant est réalisable avec la mécanisation présente dans les exploitations suisses, mais requière une importante mise en œuvre. Nettement plus conséquente que l'épandage des engrais organiques du commerce. Cependant, les différences d'exécution entre les deux procédés correspondent aux différences connues entre l'épandage des engrais de ferme (fumier, lisier) et celui des engrais organiques du commerce. Les coûts d'achats élevés des engrais organiques du commerce compensent tout ou partie des importants coûts engendrés par la fertilisation à base d'herbe.

1. INTRODUCTION

L'agriculture biologique s'est fortement affirmée ces dernières décennies et représente un moteur fondamental de l'évolution agricole qui devra relever conjointement les défis alimentaires et environnementaux à venir. Elle s'est déjà dotée de garde-fous essentiels et majeurs, tel que la non-utilisation de produits phytosanitaires chimiques et d'engrais chimiques de synthèse. Plus spécifiquement, les labels Bourgeon de Bio Suisse et Demeter qui ont un cahier des charges très abouti, demande de maintenir des prairies dans les rotations culturales afin de conserver et d'augmenter la fertilité des sols.

Les conditions socio-économiques du milieu agricole de plaine poussent certains éleveurs à abandonner leur bétail, laitier en particulier, au profit d'exploitations axées principalement sur les grandes cultures. Ceci, autant en agriculture dite conventionnelle que biologique.

Les exploitations biologiques de grandes cultures sans bétail sont entre autres confrontées à la difficulté de fournir de l'azote organique rapidement assimilable à leurs cultures. Ceci dans un espace temps précis et défini, permettant des rendements conséquents. Un palliatif existe sous forme d'engrais organique du commerce à base de sous-produits animaux principalement. Cependant ces engrais restent chers à l'achat (Aubert et al, 2013).

Une entité agricole biologique cherche à maximiser l'autonomie de son système, mis en avant par un principe de globalité, qui tend à des cycles fermés. Et ce aussi en production végétale. Sans bétail, la fertilisation de l'assolement peut tendre à se procurer des sources d'azote complémentaire provenant de son propre cycle. Les cultures intercalaires et les engrais verts, qui sont en pleine évolution, jouent déjà partiellement ce rôle.

La prairie étant un des piliers de la rotation culturale, peut-elle nous amener une solution à travers un principe d'herbe à utiliser en fertilisation directe sur cultures. Ceci, sous forme de mulch incorporé ou de manière indirecte par du compost d'herbe ?

Un essai en grandeur réelle, de fertilisation à base d'une coupe d'herbe de prairie temporaire et d'un compost d'herbe, sur une culture de maïs, a été conduit en vue de répondre à cette interrogation.

De plus, de par sa notion d'optimisation de l'utilisation de l'azote au sens global du système, par la fixation des légumineuses, l'étude se trouve en phase avec les préoccupations écologiques actuelles.

Les fondements de l'agriculture en tant qu'agroécosystème ont été édifiés de manière empirique et se sont avérés durable pendant des siècles. Cependant, avec la révolution verte, ils ont été en partie submergés par l'évolution rapide de la technologie et de la démographie. Les fondements agronomiques restent, mais le paradigme a changé. Ainsi, peut apparaître la nécessité de reconsidérer le concept des modes de production élaborés ces dernières décennies, afin d'agrandir le champ de perception de

l'innovation agronomique, pour concilier production agricole et préservation de l'environnement.

2. PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE DE L'ETUDE

2.1. La problématique

Les grandes cultures biologiques progressent en Suisse et les exploitations sans ou avec peu de bétail se trouvent confrontées à deux problématiques :

- i) d'avoir des fourrages prairiaux dont la marge brute n'est pas aussi bonne que les autres cultures annuelles mises en place,
- ii) de devoir acheter des engrais organiques du commerce pour fertiliser les cultures.

L'organisme agricole biologique aspire à une augmentation de son auto-provisionnement en éléments fertilisants, l'azote y étant un des éléments clef du rendement. Les engrais verts en tant que piège à azote, mais aussi la culture de légumineuses fixatrices d'azote reprennent à ce titre de l'importance. C'est là que la prairie temporaire riche en légumineuses révèle son potentiel en tant que fixatrice d'azote atmosphérique et pourvoyeuse d'azote pour les cultures suivantes.

En maraîchage, où le mulching est connu de longue date, des coupes d'herbe sont déjà utilisées pour protéger les cultures de légumes et fournir des éléments nutritifs.

2.2. Cadre légal

Les exploitations biologiques des labels Bourgeon (Bio Suisse) et Demeter de grandes cultures et de maraîchage, sont tenues d'avoir un minimum de 20 % de prairies temporaires, de jachère tournantes ou florales dans leur assolement. Chaque parcelle de terre assolée doit être en herbe minimum une année sur dix. Ceci, afin de maintenir la fertilité des sols (Bio Suisse, 2015).

2.3. Contexte général

Le fourrage produit par les prairies temporaires est actuellement et depuis des millénaires judicieusement valorisé par les ruminants. L'échange ou la vente de fourrage à d'autres exploitations d'élevage ne peut être remis en cause. Toutefois les contextes socio-économiques tendent à séparer géographiquement les systèmes de production. Les domaines avec peu de bétail ou sans bétail sont en plaine, alors que l'élevage, bien qu'encore présent en plaine, est plutôt sur les reliefs. La situation est encore plus marquée dans l'ouest de la Suisse, où les grandes cultures se sont développées au

détriment du bétail. Cette segmentation met en péril *l'organisme agricole* durable tel qu'il a été pratiqué de longue date. A savoir : *élevage-fumure-culture*. A l'échelle d'un territoire limité, l'échange d'amendement et de récolte est une alternative pratiquée, mais suppose de l'énergie pour le transport, conséquemment à la distance. De manière générale, les cycles doivent être resserrés et la gestion des éléments nutritifs doit être recentrée dans une gestion plus globale des cycles biogéochimiques (Recous et al., 2015).

Dès lors, une alternative est à développer qui permette de refermer le cycle au sein du système de l'exploitation en production végétale, tout en maintenant ou en augmentant la fertilité des sols. L'humus des exploitations de grandes cultures avec peu ou sans bétail en Suisse tend à baisser, menaçant la fertilité des sols à long terme (OFAG, 2014). La France fait le même constat pour ses régions de grandes cultures (Fardeau et al., 1988, cité par Piutti et al., 2015).

Il existe bien diverses cultures annuelles permettant d'optimiser les cycles de rotation culturale. Cependant, l'herbe en tant que culture pérenne avec une implantation pluriannuelle, ainsi que la fourniture d'un excellent fourrage, présente certains avantages et pourrait dès lors accroître son rôle de culture participant à l'autonomie du système dans le cycle des successions culturales.

On connaît bien la composition en éléments nutritifs de l'herbe pour l'affouragement du bétail. Il y a une certaine analogie entre la décomposition des végétaux par la digestion ruminale des bovins et la dégradation des résidus végétaux par les micro-organismes du sol (Recous et al., 2015). Et nos connaissances actuelles du sol (FiBL/Bio Suisse, 2013) permettent de dire que la digestion de la matière organique par celui-ci, augmente sa fertilité et son activité biologique. Par le maintien d'une terre fertile, l'alimentation humaine en tire profit. Dès lors, bien au-delà d'opposer les deux utilisations, le fait de diversifier le potentiel d'utilisation des prairies sous une autre forme que l'affouragement au bétail, pourrait participer à maintenir et accentuer l'attractivité des prairies dans les assolements d'exploitations sans bétail. Ce qui profiterait aussi aux exploitations d'élevage, car l'offre d'herbe se trouverait potentiellement plus importante. Ainsi à titre d'exemple, lors d'années climatiques difficiles limitant les quantités de fourrage disponible sur le marché, cette production alternative d'herbe fertilisante pourrait évidemment être utilisée pour l'affouragement.

2.4. Contexte de l'essai

Ce travail de diplôme s'inscrit dans le projet "Herbe fertilisante", pour une durée de 3 ans (2013-2015). Il tend à mener des essais conduisant au développement de l'auto-provisionnement en azote des fermes bio sans bétail, par l'utilisation de produits de fauche de prairies temporaires sous la forme d'une "coupe" de fourrage.

Cette expérimentation "Herbe fertilisante" est affiliée à la ferme pilote de Mapraz qui étudie depuis 2000, le potentiel de production des grandes cultures biologiques dans

une exploitation sans bétail, donc sans apport d'engrais de ferme. L'apport d'éléments nutritifs se fait à travers les légumineuses, la rotation des cultures et le sol.

En 2014, un essai d'herbe fertilisante sur maïs a déjà été développé à Mapraz. L'essai 2015 y fait suite.

Trois essais de fertilisation en maraîchage, utilisant de l'herbe fraîche, ont été conduits parallèlement sur céleri en 2013, 2014 et 2015 près de Mapraz.

3. QUESTIONS DE RECHERCHE

Au vu des différents essais agronomiques et empiriques dans les campagnes sur ce sujet, la question de la validité d'un tel système est encore ouverte et laisse entrevoir une alternative prometteuse. Ceci nous a amené à développer les questions suivantes dans les conditions de culture biologique d'un maïs grain, en Suisse :

- i) L'utilisation d'une coupe d'herbe de prairie temporaire comme fertilisant azoté direct de culture, peut-elle concurrencer le rendement obtenu avec les Engrais Organique du Commerce sur une culture de maïs ?
- ii) L'utilisation d'un compost d'herbe, comme moyen de conserver un potentiel fertilisant azoté, peut-il concurrencer le rendement obtenu avec les Engrais Organiques du Commerce sur une culture de maïs ?
- iii) La méthode de l'herbe fertilisante peut-elle s'inscrire techniquement et financièrement dans une exploitation de grandes cultures biologiques suisse ?
- iv) L'herbe fertilisante est-elle pertinente dans un pays avec une forte tradition d'élevage ?

4. ETAT DES CONNAISSANCES

4.1. Dynamique de l'azote organique

La vitesse de minéralisation de l'azote des produits organiques, ainsi que la quantité d'azote fournie par ces produits, sont fortement liées au rapport carbone sur azote (C/N) de ceux-ci et à leur teneur intrinsèque en azote.

De récents travaux effectués avec l'isotope de l'azote N15 ont montré que, pour des Produits Résiduaire Organiques (PRO) très variés, l'azote organique est minéralisée pour l'essentiel dans un délai de quelques semaines à un peu plus d'une année après l'apport (Bouthier et al, 2009). Henrotte et Grogna (2014) parlent de trois à cinq semaines pour que l'engrais organique soit assimilable par la plante.

La part de l'azote organique non minéralisée au cours de l'année de l'apport est intégrée dans le stock d'azote organique du sol et modifiée à moyen et à long terme, le statut organique du sol et son activité minéralisatrice (Bouthier et al, 2009; Baudoin et al, 2012), ce qui est susceptible d'améliorer ultérieurement la fourniture en azote du sol (Loiseau et al, 2002).

4.2. Rapport C/N des végétaux

Un rapport C/N bas des végétaux, sous forme de biomasse jeune ou riche en azote, fournis des éléments nutritifs conséquemment à ses teneurs. Ceci à court et moyen terme. Par contre un rapport C/N élevé participe au processus d'humification de la matière organique stable à long terme (Baudoin et al, 2012; FiBL/Bio Suisse, 2013).

Ainsi, un apport de légumineuses à un stade de développement jeune va fournir de l'azote au sol et il y a pas ou peu de matière organique qui va participer au processus d'humification. Au contraire, un apport de résidus végétaux avec un rapport C/N élevé comme des pailles de céréales, va consommer l'azote présent dans le sol pour pouvoir dégrader la forte teneur en carbone des pailles et enrichir le sol en carbone.

On perçoit ici comment les cycles du carbone et de l'azote sont étroitement liés et complémentaires.

Les figures 1 et 2 suivantes imagent la cinétique de minéralisation de l'azote de résidus végétaux en fonction de leur rapport C/N, et le taux d'azote minéralisé disponible pour la culture suivant l'incorporation.

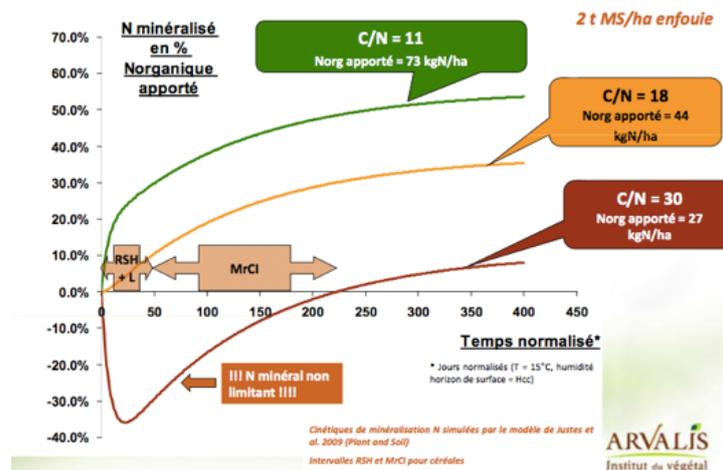


Figure 1 : Cinétique de minéralisation de l'azote des résidus végétaux selon Justes et al. (2009) et adapté par Arvalis.

carbone/azote (C/N) de la plante	% d'azote minéralisé & potentiellement disponible pour la culture suivante
C/N < 15	50%
15 < C/N < 20	40%
20 < C/N < 25	30%
25 < C/N < 30	25%
C/N > 30	20%

Figure 2 : Taux de minéralisation de résidus végétaux. Chambre Régionale de Poitou-Charentes par Véricel et Minette (2010).

4.3. La prairie temporaire dans la rotation

La prairie représente une des clefs de voûte de la fertilité des sols à long terme. L'implantation d'une culture fourragère pluriannuelle à base de légumineuses, permet non seulement de maintenir la teneur en humus et la structure du sol (Mazollier et Védie, 2008; Dragon et Icard, 2010), mais constitue aussi une source d'azote en autoproduction essentielle pour une exploitation sans bétail. Ceci par la fixation symbiotique de l'azote de l'air par les légumineuses et son relargage partiel aux plantes accompagnatrices, ainsi que par la restitution d'azote après retournement de la prairie.

L'association graminées-légumineuses des prairies se traduit par une complémentarité des deux vis-à-vis des cycles du carbone et de l'azote. La graminée amène du carbone capable d'organiser l'azote fixé par le trèfle. Le trèfle fixe plus d'azote que ce dont il a besoin, et ceci bénéficie aux graminées plus riches en carbone; graminées qui sont incapable de fixer l'azote atmosphérique.

4.4. Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par les légumineuses

La fixation symbiotique d'azote atmosphérique (N₂) est soumise à une importante dépense d'énergie pour la plante. Par conséquent, elle absorbe en premier l'azote facilement assimilable qu'elle trouve dans le sol. Ensuite commence la transformation d'azote atmosphérique en azote directement utile aux plantes. A ce titre, Triboï et Triboï-Blondel (2008) mentionnent la luzerne comme une "vraie usine de synthèse de l'azote".

La proportion de légumineuses dans le mélange prairial influence la quantité d'azote atmosphérique fixé, ainsi que le transfert de ce même azote vers les graminées accompagnatrices (Gebhard, 2012). La culture de légumineuses pures fixe moins d'azote atmosphérique que lorsqu'elles sont accompagnées par des graminées. Car les graminées absorbent prioritairement l'azote disponible du sol et contraignent les légumineuses à trouver une autre source d'azote.

Ainsi, par fixation symbiotique de l'azote atmosphérique et par son implantation racinaire, la prairie temporaire a un effet précédent cultural souligné et reconnu, avec une capacité à fixer jusqu'à 250 kg d'azote/ha et par année (Sinaj et al, 2009) dans sa biomasse aérienne. Le COMIFER (2013) parle de quelques dizaines à plusieurs

centaines de kg d'azote/ha et par année fixé par les légumineuses en symbiose avec les bactéries Rhizobium.

4.5. Restitution azotée des prairies temporaires

Avec la rompue (retournement de la prairie par un labour), le principe de l'enfouissement de prairie est connu et pratiqué de longue date. Toutefois, celle-ci se pratique essentiellement après avoir fauché et exporté le fourrage, ne laissant que peu d'herbe à enfouir. L'effet nutritif rémanent de la prairie, étant principalement dû à la partie souterraine de celle-ci. La culture suivante en tirera profit.

L'incorporation au sol de résidus végétaux fournit à la culture suivante entre 5 et 20% de l'azote contenu dans les résidus végétaux. Le reste de l'azote est valorisé plus tard. L'azote fourni à court terme correspond à une quantité de 10 à 40 kg d'azote/ha (Sinaj et al., 2009), voire 50 kg d'azote/ha (FiBL/Bio Suisse, 2013).

Dans le cas où la dernière coupe d'herbe avant rompue est broyée sur place, ce sera entre 20 et 60 kg d'azote par hectare fourni par la prairie broyée et incorporée, selon le stade de développement phénologique auquel elle se trouve (Sinaj et al., 2009). Un mélange de graminées et de légumineuses broyées à un stade phénologique jeune amène entre 20 à 100 kg d'azote/ha (FiBL/Bio Suisse, 2013).

Une luzernière de trois à quatre ans fournit un arrière effet fertilisant durant deux à trois ans (Vertès et al., 2015) après sa destruction. Après un essai de 30 ans sur le devenir de l'azote organique et minéral dans le sol, Triboï et Triboï-Blondel (2008) ont démontré un fort potentiel de fertilisation de la luzerne introduite deux ans sur six dans une rotation culturale. Ils affirment que sa présence dans une rotation peut satisfaire tout ou partie des besoins en azote du système, grâce à la fixation symbiotique. Les auteurs précisent que l'effet de la luzerne comme antécédent cultural est plus marqué que l'utilisation de la luzerne comme fertilisant.

4.6. Mulch des prairies

Le broyage sur place de luzernières ou de prairies temporaires sous forme de mulch se fait dans la pratique et en expérimental dans le but d'enrichir le sol avant une culture annuelle.

Concrètement, plusieurs agriculteurs biologiques sans élevage pratiquent en Europe méridionale la "jachère azotée". Poupeau (2012) en a fait une synthèse dont voici quelques exemples :

- Bernard Fouchault, céréalier dans le Loir-et-Cher sur 130 ha, n'apporte aucun intrant extérieur et pratique la "jachère azotée" dans sa rotation trois ans et demi sur neuf. Le mélange graminées-légumineuses est uniquement broyé ou fauché sur place. En 2003 et 2005, suite à la sécheresse, le fourrage a exceptionnellement été exporté du domaine

pour l'affouragement du bétail. Démontrant, si nécessaire, la complémentarité du système avec l'élevage.

- Jean-Marc Rozet, céréalier dans le Loir-et-Cher, applique une "jachère azotée" de deux ans et demi sur six dans sa rotation. Le mélange trèfle-luzerne est entièrement restitué au sol pour les deux cultures suivantes.

- Joël Payment, céréalier en Charente, n'utilise plus de fertilisant depuis dix ans. Il plante une luzerne en terre superficielle pour trois ans. Sur les limons profonds il plante un trèfle violet pour deux saisons.

- mais aussi des céréaliers autrichiens sans bétail, en agriculture biologique, implantent de la luzerne pendant deux ans comme précédent à deux campagnes de blé. La luzerne est broyée et laissée sur place à plusieurs reprises pendant son cycle.

Cependant cette pratique du broyage de l'herbe en place, donc sans exportation du fourrage, limite la fixation azotée des légumineuses en place (Jäger et al, 2013) qui privilégient la réutilisation de l'azote fournie par le broyat plutôt que la fixation biologique. Cette pratique est aussi soumise à un risque de lixiviation dans des sols légers en présence de fortes pluies. Pour ces raisons, l'exportation du fourrage serait à privilégier, sauf pour la dernière coupe avant rompie qui permet une valorisation de l'azote par la culture suivante (Tamarcaz, 2011).

4.7. Fertilisation de cultures avec de l'herbe

L'essai de longue durée à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) de Clermont-Ferrand, sur le devenir de l'azote organique et minéral dans le sol, a aussi permis à Triboï et Triboï-Blondel (2008) de démontrer que la fertilisation à base de luzerne a un effet fertilisant marqué sur les rotations qui ne contiennent pas de culture de luzerne, par contre l'effet n'est pas marqué dans les rotations où la luzerne est cultivée.

On peut ainsi déduire par analogie que l'optimisation du système d'herbe fertilisante au sein de l'exploitation passerait par une exportation des coupes d'herbe sur les rotations qui contiennent peu ou pas de prairie.

Un réseau d'essais français a expérimenté pendant trois ans, l'efficacité d'engrais à base de luzerne sous différentes formes, dont l'ensilage de luzerne et le pseudo-compost en comparaison aux fientes de poules (Weber et al., 2015). Les essais ont été menés sur du blé et fertilisés à raison de 60 kg d'azote/ha, soit une fumure à faible intrant. En synthèse pluriannuelle, les auteurs concluent que les produits fertilisants à base de luzerne ont permis un gain de rendement en regard au témoin, mais plus faible que le fertilisant sous forme de fientes de volailles. L'ensilage de luzerne ayant le rendement le plus proche des fientes de volailles. Les auteurs insistent que ces conclusions sont à interpréter comme des tendances.

Afin de trouver des alternatives de fertilisation pour le maïs grain en Picardie, les chambres d'agriculture de la région ont testé l'intérêt d'un apport de luzerne fraîchement broyée comme paillis source d'azote (Bertrand et al., 2011). Les résultats ont mis en avant un réel problème de désherbage du maïs et d'étouffement de celui-ci dû à un paillis épandu sur la culture en place, et par conséquent non incorporé au sol. D'autre part, les analyses a posteriori de reliquat azoté ont montrées que l'azote n'était pas le facteur limitant de la parcelle.

En Finlande, des expérimentations de 1996 à 1999 (Schäfer et al., 2001) utilisant entre autres du trèfle violet et de la luzerne comme mulch d'herbe appliqué sur des cultures de printemps, ont montrées que la minéralisation de l'azote du mulch d'herbe est trop lente en sortie d'hiver dans les conditions finlandaises. Les besoins nutritionnels d'une culture de printemps dans ces conditions n'étant pas couverts.

Wiens et al (2006), dans le Manitoba, ont testé le paillis de luzerne sur un blé de printemps en agriculture biologique. Le rendement grainier du blé était équivalent au blé ayant reçu 20 ou 60 kg par hectare de nitrate d'ammonium. Les grains de blé étaient toutefois plus riches en protéine sur le paillage que ceux du blé fertilisé avec des engrais chimiques. Ils ont aussi observé un effet rémanent de l'azote provenant de l'engrais organique sur la culture suivant le blé. Là aussi, le rendement grainier de l'avoine cultivé la deuxième année de l'essai était meilleur qu'avec l'application de nitrate d'ammonium. Ce qui leur fait dire que le paillis de luzerne s'avère prometteur pour les systèmes de culture à faible apport d'intrants.

D'autres essais de particuliers dans les campagnes témoignent de l'intérêt porté à cette méthode. Ainsi, en Mayenne, trois maraîchers fonctionnent actuellement avec un apport conséquent d'herbe de fauche, de prairie permanente ou de luzerne. Les effets recherchés sont entre autres, un apport d'éléments progressivement assimilable par la culture, une autonomie vis-à-vis des intrants, un apport azoté suffisant et une redynamisation de l'activité biologique du sol (Chauvel et Herody, 2014).

En Allemagne, un maraîcher utilise le paillage d'herbe à base de graminées-légumineuses ou prairie permanente avec un effet mulch comme objectif. Il démontre que les rendements sont nettement supérieurs au témoin (Storch, 2012).

Biotrio, grande exploitation au Pays-Bas, à la pointe de la technique moderne, vise l'autonomie en intrant. Pour ce faire, la luzerne est soit échangée contre du lisier; soit elle est récoltée, hachée et épandue comme fertilisant (Ryckmans, 2012).

L'épandage d'engrais vert sur une culture est commun en agriculture tropicale où il est utilisé principalement pour la fertilisation azotée et contre l'érosion (Schäfer et al, 2001; Boissière, 2008).

5. METHODOLOGIE DE L'ESSAI MAÏS 2015

5.1. Description du site

L'essai de plein champ, situé à Vandoeuvres aux abords de Genève (figure 3), a été intégré au sein d'une parcelle dédiée à la culture d'un maïs grain sur un terrain plat entouré de grandes haies.

Altitude 440m / Coordonnées (m) : 2'505'365, 1'120'114.



Figure 3 : Plan de situation de la parcelle à Vandoeuvres et de la station météo de référence à Lullier.

Le sol de la parcelle est un limon argileux, fortement silteux. Présentant respectivement des taux d'Argiles, de Silts et de Sables de 40%, 37,5% et 22,6%. Le taux de matière organique est à 3,4%. Le pH s'exprime à 7,6.

Le précédent cultural est un blé suivi d'un engrais vert en interculture, composé majoritairement de graminées et dans une moindre mesure de moutarde. Il a été broyé début mars, suivi d'un passage de déchaumeurs à pattes d'oie pour l'incorporer.

En avril, avant l'épandage des engrais, deux passages d'outils non-animés ont été effectué afin d'ameublir le sol et affaiblir les herbes indésirables qui se présentaient.

La parcelle est en non-labour depuis dix ans.

5.2. Dispositif

Le dispositif expérimental d'une surface de 72m*30m comprend 3 répétitions et 7 procédés de fertilisation en blocs aléatoires à randomisation partielle (figure 4). Les unités expérimentales ont une surface de 18m*6m, excepté pour trois d'entre-elles qui font 12*6m (choix géométrique). Les blocs Herbe et Compost, simple et double dose, se

succèdent dans les répétitions d'Est en Ouest pour des raisons pratiques de passage avec l'épandeuse.

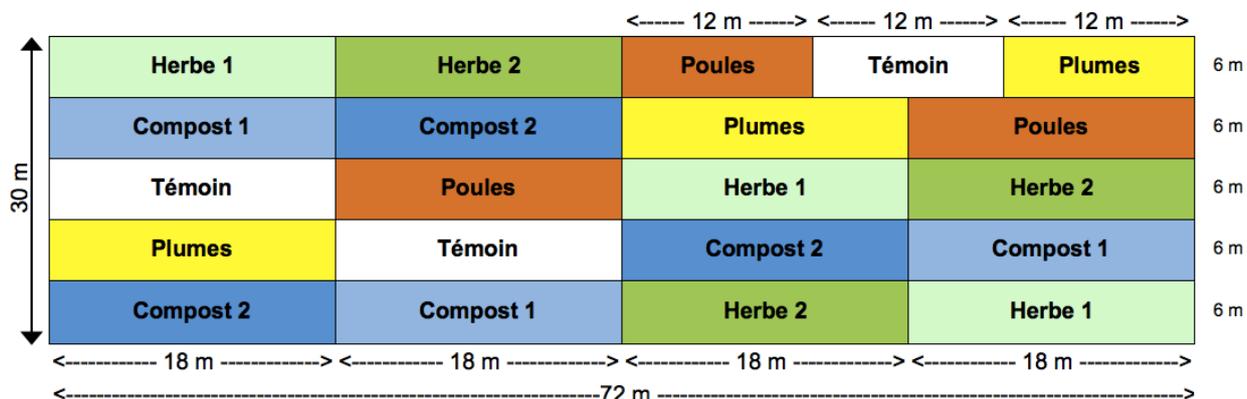


Figure 4 : Plan de répartition des procédés et des répétitions au début de l'essai.

5.3. Fertilisants

Le tableau 1 présente les différents fertilisants utilisés pour l'essai.

Tableau 1 : Dénomination des procédés, des quantités d'azote épandues et composition des fertilisants.

1)	Herbe1	équivalent 104 kg/N/ha sous forme d'herbe fraîche hachée
2)	Herbe2	équivalent 208 kg/N/ha sous forme d'herbe fraîche hachée
3)	Poules	équivalent 110 kg/N/ha sous forme de fumier de poules séché
4)	Témoin	sans fertilisation
5)	Plumes	équivalent 110 kg/N/ha sous forme de farine de plumes et de mélasse
6)	Compost1	équivalent 179 kg/N/ha sous forme de pseudo-compost d'herbe de 6 mois
7)	Compost2	équivalent 357 kg/N/ha sous forme de pseudo-compost d'herbe de 6 mois

La fertilisation est basée sur les recommandations officielles pour une culture de maïs, soit 110 kg d'azote/ha (Sinaj et al., 2009). Tous les fertilisants ont été analysés en laboratoire avant l'épandage, l'herbe a été analysée une deuxième fois après épandage pour connaître la quantité d'azote qui a effectivement été épandue (tableau 2). En effet, la teneur en azote de l'herbe évolue vite au printemps. La première analyse de celle-ci nous a donnée une idée de la quantité à épandre le jour J, en fonction de l'évolution possible de sa teneur en azote entre le moment de la première analyse et l'épandage. Ensuite, l'herbe effectivement épandue, analysée une deuxième fois a posteriori, a révélée une teneur en azote légèrement plus faible que celle estimée. Il s'agissait d'une herbe verte riche en légumineuses (L).

Tableau 2 : Description et résultats d'analyse des produits fertilisants utilisés.

		MS % de MF	Ntot Kg/t MS	NH4-N Kg/t MS	C/N
Herbe	Herbe verte riche en L	17.7	39.1	2.19	13.1
Poules	Fumier de poules séché	87.7	26.5	3.74	14.2
Plumes	Farine de plumes, mélasse	94.3	132.3	8.19	4.1
Compost	Compost d'herbe verte	21.3	38.8	1.01	10.5

5.4. Récolte de l'herbe

La prairie dont nous disposons pour fournir l'herbe hachée, est issue d'un semis de Mst 323¹ (figure 5) en deuxième année d'exploitation, implantée sur le site du domaine expérimental de Mapraz. L'analyse de la composition botanique du mélange a déterminée une prairie riche en légumineuses à plus de 80% (73% de luzerne et 10% de trèfle violet). La figure 6 illustre la récolte de l'herbe au stade 2, selon l'échelle ADCF². La récolte a été effectuée le 21 avril avec une faucheuse à fléaux. Les brins hachés présentaient une longueur de 1 à 8 cm avec une majorité entre 2 et 5 cm (figure 7). Quelques heures après la fauche, l'herbe a été épandue avec une épandeuse à fumier, à vitesse et réglage régulier en un passage pour les simples doses, deux passages pour les doubles doses (figure 8).



Figure 5 : Mst 323 à la récolte.

Figure 6 : Récolte de l'herbe.

¹ Mst : Mélanges standards pour la production fourragère. 323 : Mélange à base de luzerne et de graminées (Dactyle, Fétuque des prés et Fléole), ainsi que du trèfle violet.

² Echelle ADCF : Echelle des stades de développement des prairies communément utilisée en production fourragère en Suisse.



Figure 7 : Herbe épanchée et longueur de hachage des brins.

Figure 8 : Epanchage de l'herbe (Photo : Benoît Ferrand).

5.5. Origine du compost

Le compost d'herbe utilisé est issu d'une fauche d'un mélange Mst 323, composté six mois durant l'hiver, retourné une fois, non couvert, et amené selon le même principe que l'herbe hachée. Il s'agit plutôt d'un pseudo-compost.

5.6. Epanchage et incorporation des fertilisants

L'épandage des fertilisants s'est fait le 21 avril, qui est un compromis entre un délai de deux à trois semaines avant la date prévue de semis du maïs et un rapport entre la quantité d'herbe disponible et la teneur en azote de celle-ci, permettant de couvrir les besoins de l'essai. Il était attendu que l'herbe jeune, avec un faible rapport C/N et une faible teneur en matière sèche, agisse assez rapidement à cette période.

Autant l'herbe que le compost épanché ont été quantifiés en volume pour l'épandage et appliqués avec une épandeuse à fumier, ce qui n'a pas permis d'être très précis, surtout pour le compost où le réglage de la machine a été difficile à effectuer sur les petites parcelles de l'essai. Ceci explique les différences d'apports en simple dose entre les différents procédés. La densité de l'herbe a été calculée sur le terrain et celle du compost fournie par l'analyse.

Pour les Engrais Organiques du Commerce (EOC), les plus petites quantités à épandre ont permis de le faire à la main (figure 9).

L'ensemble des fertilisants a été incorporé le lendemain par un passage d'outil de type déchaumeur à pattes d'oie, à une profondeur de 8-10cm. Il restait un peu d'herbe et de compost en surface (figure 10).



Figure 9 : Epannage des EOC à la main (Photo : Benoît Ferrand).

Figure 10 : Essai après l'incorporation des engrais organiques.

5.7. Semis et itinéraire cultural

Un deuxième passage d'outils à dents non-animés a succédé au précédent quinze jours après pour lutter contre les repousses de graminées.

La préparation finale avant le semis s'est faite à la herse rotative plus un vibroculteur directement croché derrière la herse.

Au 19 mai, le maïs de la variété Gottardo est semé à 7 cm de profondeur et à 95'000 grains hectare. Le sol bien préparé présente de la terre grumeleuse et fine au niveau des grains et des agrégats plus grands en surface. Plus d'herbe, ni de compost apparent.

Puis, après le semis et pendant quinze jours, un voile de forçage a été posé afin de le protéger des corneilles.

Enfin, la culture a été sarclée deux fois et il y a eu un lâcher de trichogrammes pour lutter contre la pyrale du maïs.

5.8. Prélèvements de sol

A trois reprises, des prélèvements de sols ont été effectués pour déterminer la teneur en azote minéral (Nmin) du sol.

- Premièrement, pour quantifier le reliquat en sortie d'hiver (RSH) le 24 mars. Les conditions climatiques précédents le 24 mars ayant très probablement déjà permis le début de la minéralisation. La parcelle expérimentale étant restreinte en surface, 12 prélèvements ont été effectués sur l'ensemble de l'essai, à trois niveaux de profondeur (0-30 / 30-60 / 60-90). Les 12 échantillons de chaque profondeur ont ensuite été mélangés puis analysés.

- Deuxièmement, le 4 juin, environ 6 semaines après l'épandage des engrais organiques, afin de situer l'évolution du Nmin. Cette deuxième campagne de prélèvement concernait quatre procédés : Témoin, Herbe1, Herbe2 et Compost1 (en raison de contraintes budgétaires); 12 prélèvements par procédé ont été effectués, sur une seule profondeur (0-30).
- Le troisième prélèvement a été effectué en post-récolte le 5 octobre et analysé selon le même schéma que le deuxième.

5.9. Récolte du maïs

La récolte s'est faite à la main le 1er octobre, les tiges ont été coupées à une hauteur de 20cm, sur une surface de 11,25m² (3 lignes de 5m) par procédé. Le but étant d'atteindre 100 plantes prélevées pour avoir un échantillon représentatif. L'objectif n'a pas toujours été atteint. Il manquait quelques tiges par endroit.

Les épis ont été séparés des tiges, ils ont été pesés et égrenés. Puis le taux d'humidité des grains a été mesuré pour avoir le rendement. Les rendements maïs grain ont été standardisés à 14% d'humidité.

Afin d'avoir aussi une récolte de référence en version maïs plante entière (MPE), le reste de la biomasse récoltée a été pesé et un échantillon a été passé à l'étuve pour établir le rendement en matière sèche (MS). Les résultats obtenus, ajoutés à ceux du grain transposé en matière sèche, constituent la version MPE quantifiée en matière sèche.

Pour des questions de contrainte de budget, nous n'avons pas effectué d'analyses des teneurs en nutriments du maïs en vue de déterminer précisément les exportations de minéraux. Pourtant cela aurait été précieux a posteriori pour effectuer plus rigoureusement le bilan azoté de la culture.

6. RESULTATS

6.1. Evolution du dispositif expérimental

L'essai, placé en bordure de champs à 17m d'une importante haie (figure 11), a été perturbé par l'influence claire de celle-ci dû à la sécheresse de l'été 2015. Bertrand Favre, qui est l'agriculteur exploitant la parcelle, n'a lui-même jamais observé une telle situation à cet endroit.

Ainsi les deux procédés Compost des répétitions II et III sont inutilisables. Les deux procédés Herbe de la répétition III sont aussi inutilisables (figure 12). En conséquence, les deux procédés Compost de la répétition I sont aussi écartés de l'analyse, car il ne reste qu'un résultat par procédé Compost.

Dès lors, ceci ne nous permettra pas de répondre à la 2ème question qui concerne la validité de l'utilisation du compost comme alternative aux EOC.

Le reste de l'essai a aussi subi la sécheresse, mais de manière homogène.

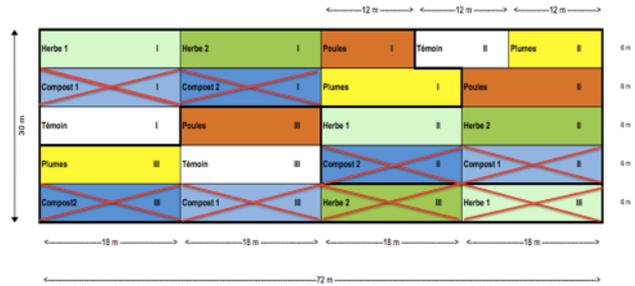


Figure 11 : Influence de la haie sur le dispositif.

Figure 12 : Procédés restants après suppression des procédés impactés par la sécheresse ainsi que la suppression des procédés Compost de la répétition I.

Par conséquent l'analyse des résultats se fait avec cinq procédés - Herbe1, Herbe2, Témoin, Plumes et Poulès. Les résultats sont présentés avec deux répétitions pour Herbe1 et Herbe2 et trois répétitions pour Témoin, Plumes et Poulès.

Ainsi, les résultats ci-après sont à interpréter avec précaution. De plus, avec seulement deux répétitions qui ont pu être valorisées pour certains procédés, la variabilité des résultats dans ces cas-là est indicative.

6.2. Maïs grain

Le meilleur rendement grain est atteint par Herbe2 avec 46 dt/ha, suivi de près par le procédé Plumes avec 43 dt/ha, alors que le procédé Poulès a le rendement le plus faible avec 30 dt/ha (figure 13).

En situation intermédiaire, Herbe1 et Témoin ont des rendements similaires d'environ 37 dt/ha. Avec respectivement 104 et 0 kg d'azote apportés.

La variabilité est moyenne à forte, excepté pour Herbe1 où elle est plus faible.

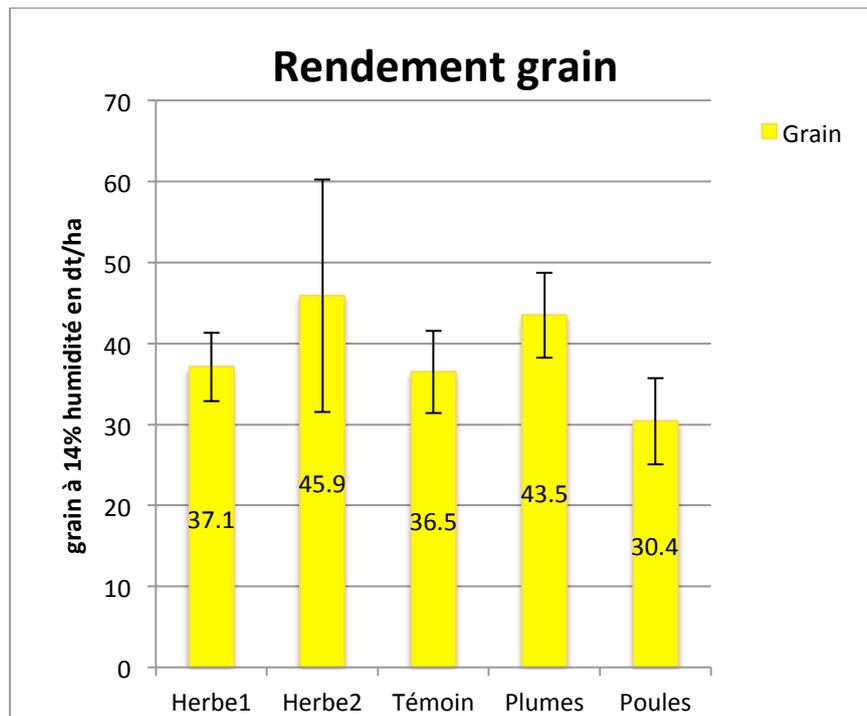


Figure 13 : Rendement du maïs grain ramené à 14% d'humidité en dt/ha.

6.3. Maïs plante entière

Pour le maïs plante entière, c'est aussi Herbe2 qui a le rendement le plus élevé avec 104 dt/ha, suivi du procédé Plumes avec 95 dt/ha. Herbe1 et Témoin ont des rendements intermédiaires avec plus ou moins 87 dt/ha. Le procédé Poules a un rendement légèrement plus faible avec 84 dt/ha (figure 14).

La variabilité est moyenne dans l'ensemble, sauf pour Herbe1 où elle est faible.

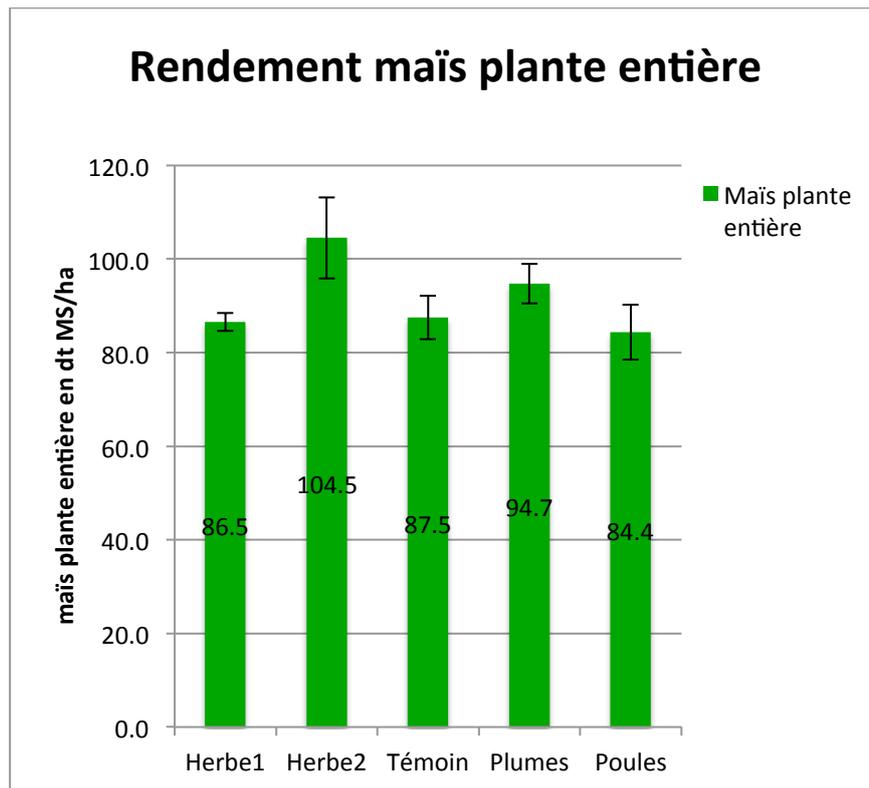


Figure 14 : Rendement maïs plante entière (MPE) en dt de matière sèche par ha.

6.4. Rapport maïs grain sur maïs plante entière

Bien qu'il y ait une corrélation entre les 2 courbes de rendement du maïs grain et du maïs plante entière (figure 15), on observe que le procédé Poules présente un rendement significativement plus faible que Herbe1 et Témoin en maïs grain, alors que les trois procédés ont des rendements similaires en maïs plante entière. En mettant en avant le pourcentage de grain face au rendement du maïs plante entière, on observe un rapport notablement plus faible pour le procédé Poules (figure 16) en comparaison aux autres procédés. Alors que le procédé Plumes à une nette tendance inverse.

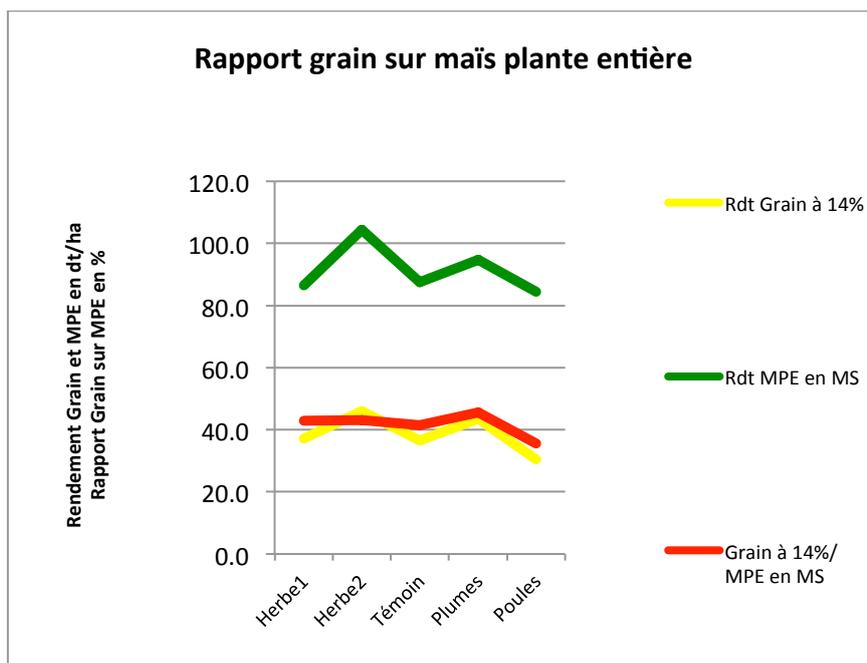


Figure 15 : Corrélation des 2 courbes de rendement maïs grain et maïs plante entière.

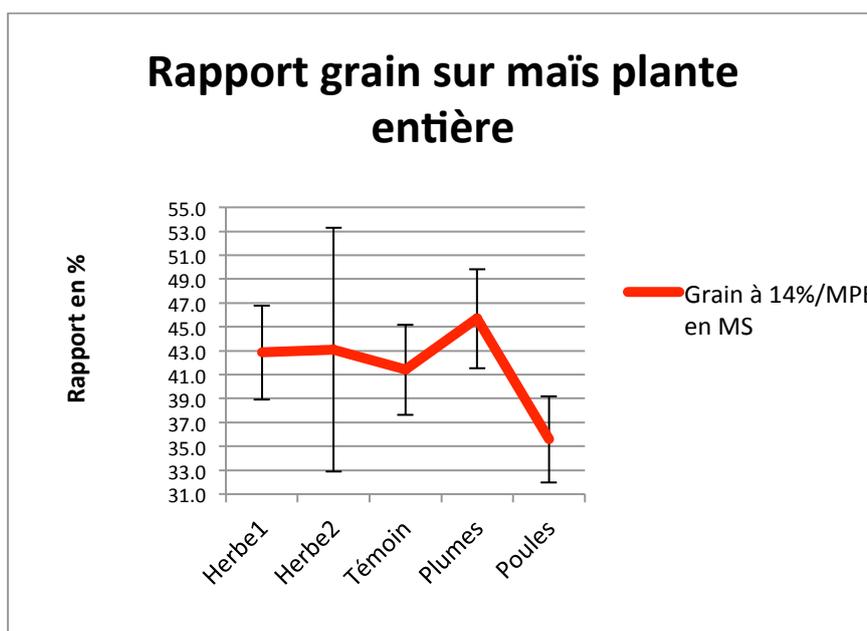


Figure 16 : Rapport maïs grain sur maïs plante entière détaillé.

6.5. Nombre de tiges et d'épis par procédé

Des mesures ainsi que des comptages au champ et en laboratoire ont encore permis de relever quelques différences qui corroborent les résultats du rapport maïs grain sur MPE. La référence utilisée ici correspond à 100 plantes potentiellement présentes sur la surface récoltée de 11,25m². Le calcul a été établi avec un semis à 95'000 grains/ha minoré de 5% de pertes dues à la levée et aux conditions du sol (Arvalis, 2016a).

Les procédés Herbe ont les meilleures proportions d'épis par tiges et les procédés Témoin et Plumes sont en situation intermédiaire. Le procédé Poules se trouve avec les moins bons rapports (figure 17). Le déficit conséquent du nombre d'épis avec grain et du pourcentage d'épis viable par tige (épis total moins épis charbonné) du procédé Poules est le plus flagrant.

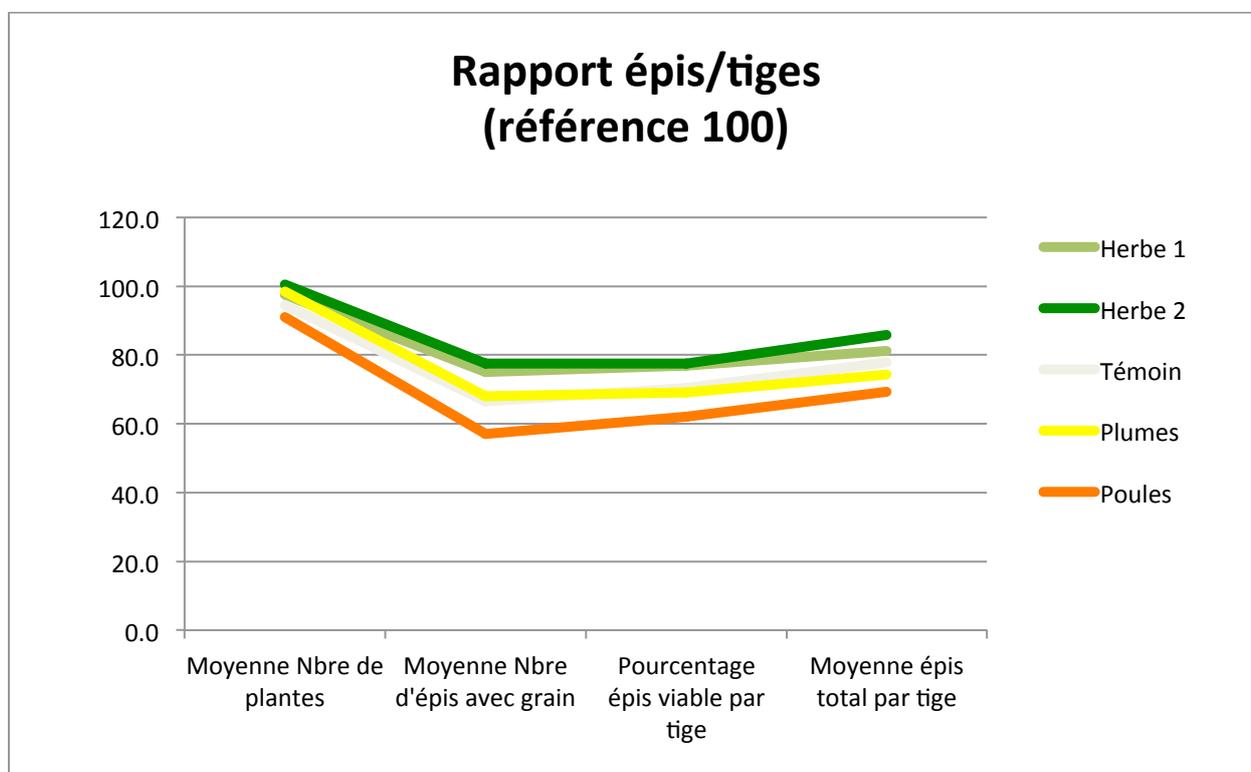


Figure 17 : Rapport de proportion entre épis et tiges.

7. DISCUSSION

Les conditions météo de l'année 2015 ont été particulières et ont marqué plus ou moins fortement la plupart des maïs de l'ouest de la Suisse. Les rendements sont de l'ordre de 50% de la moyenne dans la région genevoise (A. Jobin, communication personnelle du 10 décembre 2015) et le rendement obtenu par l'agriculteur sur l'ensemble de la parcelle incluant l'essai, correspond aussi à la moitié du rendement en année "normale". Les résultats de notre essai reflètent cette tendance générale. Bertrand Favre (communication personnelle du 15 janvier 2016) confirme que l'eau est un facteur plus limitant pour la croissance du maïs que l'azote. L'azote est mis en valeur par cette culture pour autant qu'il y ait de l'eau (Arvalis, 2016b).

L'absence de grande différences de rendement entre les procédés s'explique par les contraintes climatiques (sécheresse de l'été 2015), mais aussi par le fait que l'azote n'a pas été le facteur limitant.

Nous allons donc, dans un premier temps, discuter l'effet de ces deux facteurs qui ont conditionné les résultats de l'essai. Pour ensuite détailler le comportement des engrais organiques après leur épandage. Et finalement comparer les rendements à ceux d'autres essais similaires.

7.1. Effet de l'année

La courbe de pluviométrie de cette année est particulière comparée à la moyenne de 2006-2014³. Du 1er janvier jusqu'à la date de récolte du maïs le 1er octobre, il a plu 630mm alors que la pluviométrie moyenne 2006-2014 pour la période considérée est inférieure à 600mm. Ce qui est particulier, c'est la répartition des pluies. La figure 18 schématise bien les deux périodes marquées par des précipitations intenses à la fin avril/début mai et à mi-septembre, ainsi qu'un déficit hydrique marqué du 21 mai au 20 août, période qui correspond à la mise en place du maïs et à ses importants besoins hydriques autour de la floraison, à fin juillet. Malgré des précipitations totales plus importantes que la moyenne des neuf dernières années, la répartition des pluies a engendré un déficit hydrique cultural de 316 mm (pluviométrie moins évapotranspiration).

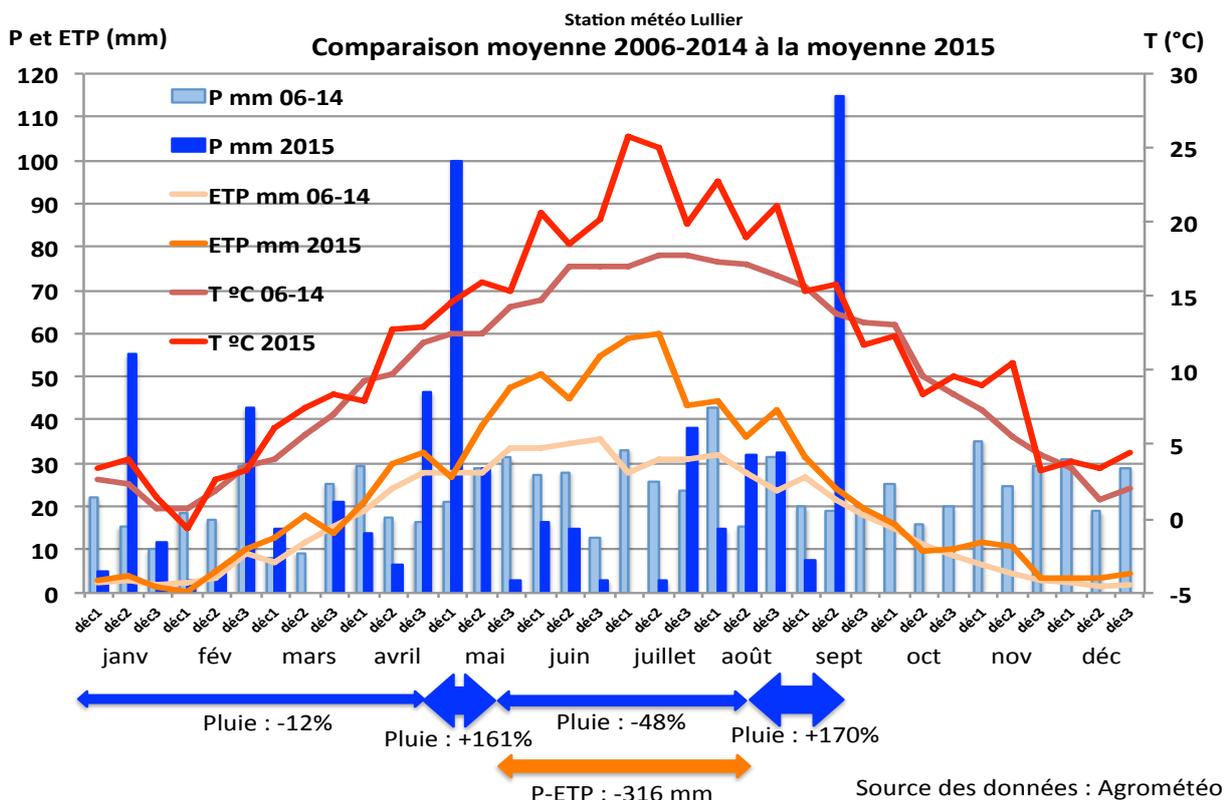


Figure 18 : Comparaison de la pluviométrie et de l'évapotranspiration 2015 en regard à la pluviométrie moyenne et l'évapotranspiration moyenne 2006-2014, par décennie.

³ La moyenne des 9 années précédentes l'année en cours a été choisie car elle correspond aux données disponibles de la station Agrométéo de Lullier, qui est la plus proche de l'essai.

Si les températures ont été favorables à la minéralisation des engrais organiques - on atteint 15°C de moyenne journalière au début mai -, les grandes précipitations qui ont suivies l'épandage peuvent avoir joué un rôle antagoniste. D'une part en favorisant la transformation des engrais organiques et d'autre part par une éventuelle lixiviation de l'azote minéral. Au moment de la fertilisation, le sol était sec et a favorisé la mise en place technique des engrais. Ensuite il y a eu quelques pluies qui ont permis de ré-humidifier le sol, dynamiser l'activité biologique et déliter les pellets d'EOC. Quelques jours après, début mai il est tombé 100 mm de pluie alors que le sol était sans culture et que la minéralisation des engrais avait peut-être déjà commencé. Du moins, il y avait l'azote minéral du sol mesuré en sortie d'hiver (cf. sous-chapitre suivant). Dès lors, il se pourrait qu'une partie de cet azote minéral ait été lixivié (COMIFER, 2013; Bouthier et al. 2009).

De manière plus pragmatique, en admettant qu'une partie de l'azote apporté n'a pas été valorisé comme prévu en fin de printemps, mais seulement après les fortes pluies printanières, et que la sécheresse n'a pas permis au maïs de le valoriser pour accroître son rendement, on devrait le retrouver dans les Nmin effectués en post-récolte. Hors on en retrouve qu'une partie à une profondeur de 0-30 cm. A cette période, nous n'avons pas prélevés d'échantillons de sol au-dessous de 30 cm (toujours pour des contraintes budgétaires). Pourtant des analyses Nmin à ce moment-là au-dessous de la profondeur de 0-30 cm nous auraient certainement renseignés.

En regardant la pluviométrie, on observe qu'à mi-septembre il est tombé 112 mm en 5 jours, correspondant à la 2ème période annuelle de grosses pluies et au moment où le maïs commence à dessécher. L'éventualité d'une lixiviation partielle en profondeur à ce moment-là n'est pas à écarter.

7.2. Fourniture d'azote de la parcelle

7.2.1. Disponibilité de l'azote du sol

Plusieurs prélèvements de sol ont permis de déterminer l'azote minéral disponible à des moments clés de la culture. Les premières analyses Nmin de sol à 0-30 cm en sortie d'hiver le 24 mars, indiquent un pool d'azote disponible de 120 kg par hectare. Ce qui est plus que suffisant pour le démarrage de la culture. Serge Amiguet (communication personnelle du 12 janvier 2016) atteste que les Nmin de sol effectué en 2015 sur des parcelles de référence régulièrement analysées en Suisse romande, ont tous des valeurs élevées. Confirmant que les conditions climatiques de cette année, ont globalement conduit à une "*année nitrifiante*" pour la matière organique des sols. Dans le cas de notre essai, l'engrais vert broyé début mars, a pu de manière plausible contribuer à cette valeur, d'autant plus que le taux de matière organique du sol est à 3,4%.

Ce reliquat en sortie d'hiver à 120 kg d'azote disponible par hectare est conséquent, mais se trouve dans la littérature. Comme par exemple dans ce réseau d'essai en Ile-

de-France cité dans l'état des connaissances qui présentait des reliquats en sortie d'hiver (RSH) de 20 à 140 kg d'azote/ha bien qu'avec un type de précédent commun (Weber et al, 2015).

La deuxième analyse Nmin de sol à 0-30, dont le prélèvement du 4 juin a été effectué six semaines après l'épandage des engrais organiques, présente respectivement 132, 145 et 139 kg d'azote disponible pour Témoin, Herbe1 et Herbe2. Cette augmentation des valeurs pourrait correspondre à la minéralisation de l'humus de base pour la période donnée, du fait du peu de différence qu'il y a entre les trois procédés. Ceci nous laissant supposer que les apports ne sont pas encore disponibles ou très peu. Ceci en tenant compte du développement du maïs qui se trouvait au stade 4 feuilles étalées (BBCH⁴) le 4 juin, n'ayant en conséquence prélevé qu'une faible part d'azote (Plenet, 1995; Soënen et Bouthier, 2015).

En post-récolte, les teneurs Nmin de sol à 0-30 cm sont respectivement de 41, 53 et 50 kg d'azote disponible pour le Témoin, Herbe1 et Herbe2.

7.2.2. Minéralisation potentielle de l'humus

Il est possible d'estimer théoriquement la minéralisation potentielle de l'humus de base du sol (Mh) pendant la culture, en prenant le témoin comme référence et en calculant la consommation théorique d'azote par le maïs.

Pour faire le calcul (tableau 3), on admet une consommation de 11,5 kg d'azote par tonne de MS produite en MPE selon les normes de fumure suisse (Sinaj et al., 2009). Ce qui donne pour le témoin avec un rendement de 89 dt, une consommation théorique d'azote pour son cycle de 102 kg, auxquels on soustrait la différence qu'il y a entre les reliquats azotés mesurés avant la culture (120 kg) et en post-récolte (41 kg). Ainsi, on arrive avec ce calcul ($102 - (120 - 41)$) à 23 kg d'azote provenant de la minéralisation de l'humus de base durant la culture. Si on se réfère aux normes Arvalis (2015) qui sont de 14 kg d'azote consommé par tonne de MS produite pour un rendement hectare inférieur à 14 tonnes. On atteint, selon le même principe de calcul, 46 kg d'azote provenant de la minéralisation de l'humus de base durant la culture ($125 - (120 - 41)$).

Certaines références de la littérature parlent de 95 kg d'azote (Oost et Toffoli, 2012) provenant de la minéralisation de l'humus de base durant la période de culture du maïs ou jusqu'à 110 kg d'azote (Billy, 2009) pour des sols similaires à celui de l'essai. L'arrêté français définissant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Ile-de-France (2015) mentionne 85 kg d'azote en argiles et limons. Il est certes difficile de faire des comparaisons à ce niveau-là, tant les conditions pédoclimatiques peuvent différer, mais les conditions très sèches de l'été 2015 pourraient contribuer à expliquer les valeurs moyennes de l'estimation.

⁴ BBCH : Echelle des stades phénologiques des mono- et dicotylédones cultivées utilisée pour la culture du maïs.

Avec le calcul théorique de minéralisation de l'humus durant la culture, ainsi que la consommation théorique d'azote selon le rendement du maïs, on peut déduire l'apport potentiel d'azote par la fertilisation. Ainsi Herbe1, avec un rendement de 86 dt de rendement (MS) en MPE, aurait eu une consommation d'azote selon les normes de fumure suisse de 99 kg (Sinaj et al., 2009), auxquels on soustrait la différence qu'il y a entre les reliquats azotés mesurés avant la culture (120 kg) et en post-récolte (53 kg), ainsi que la minéralisation de l'humus (23 kg), on arrive à 9 kg d'azote amené par la fertilisation ($99 - (120 - 53) - 23 = 9$). On atteint selon le même calcul pour Herbe 2 ($119 - (120 - 50) - 23 = 26$), 26 kg d'azote issu de la fertilisation. Alors que l'apport des fertilisants épandu au 21 avril correspond respectivement pour Herbe1 et Herbe2 à 104 et 208 kg d'azote organique total.

Tableau 3 : Données pour le calcul de la minéralisation de l'humus de base (Mh).

	RSH Nmin	Fertilisation		Rdt maïs		Conso selon DBF 11.5 kgN/tMS	Conso selon Arvalis 14kg/tMS	Mh potentiel selon DBF	Mh potentiel selon Arvalis	N potentiel apporté selon DBF	N potentiel apporté selon Arvalis
		24 mars N	21 avril N	Nmin post- récolte	4 juin 5 octobre dt						
Témoin	120	0	132	41	89	102	125	23	46	0	0
Herbe1	120	104	145	53	86	99	120	23	46	9	8
Herbe2	120	208	139	50	104	119	146	23	46	26	30

Même en admettant une marge d'incertitude sur le calcul ou une consommation de luxe par la culture, le bilan n'est pas équilibré.

En se focalisant sur Herbe1, avec 9 kg d'azote théoriquement apporté à la culture, alors que la fertilisation correspondait à 104 kg (Ntot), pour lesquelles on peut retenir un ordre de grandeur de 26 à 40% de l'N contenu dans les résidus végétaux, qui est minéralisé et disponible pour la culture (Thomsen et al., 2001, cité par Baudoin et al., 2012), ou 20 à 50% (Vericel et Minette, 2010). Il manque une partie de cet azote apporté, qui n'a ainsi pas profité à la culture, mais qui se trouve soit perdu, soit momentanément retenu dans le sol.

Le calcul de la minéralisation de l'humus de base reste théorique et ne prend pas en compte les pertes par voie gazeuse ou de lixiviation.

7.3. Effet fertilisant des engrais organiques

7.3.1. Conditions de minéralisation des engrais organiques

La fertilisation organique anime un ensemble de paramètres nombreux et complexes qui se passent pour la plupart dans la "boîte noire" du sol. Si bien qu'il est difficile d'en percevoir les fonctionnements exacts et d'en définir et expliquer tous les éléments et variables qui interagissent, pour fournir des références très précises.

Néanmoins, quelques conditions jouant un rôle majeur dans la dégradation de la matière organique sont connues, tel que la température et l'humidité du sol (COMIFER, 2002; Vertès et al, 2015) ou le rapport C/N des produits (Justes et al, 2009), mais aussi la nature et l'état du sol, l'activité biologique, etc.

La forme du produit joue également un rôle non-négligeable. A savoir la grosseur des particules mises en contact avec les décomposeurs du sol, sous forme de pellets ou de poudres pour les EOC, de broyage ou non des végétaux (Leclerc, 2009a; Recous et al., 2015).

7.3.2. Cinétique de minéralisation des engrais organiques

Herbe et résidus végétaux

La cinétique de minéralisation de l'azote des résidus de culture (figures 19) peut aller de quelques semaines à plusieurs mois suivant le produit et les conditions (Bouthier et al, 2009) et est d'autant plus rapide si le résidu est riche en azote (COMIFER, 2013; Justes et al., 2009).

Dans le cas d'herbe jeune, stade 2-3 de développement phénologique des plantes (selon échelle ADCF), la minéralisation peut commencer rapidement lorsque le rapport C/N est autour de 10 (FiBL/Bio Suisse, 2013) ou moins que 13 (Justes et al, 2009).

L'herbe épandue sur l'essai avait un rapport C/N de 13 et un bon taux d'azote intrinsèque correspondant à 3,9% de la MS, permettant de supposer qu'il y aurait une minéralisation plutôt qu'une organisation de l'azote. Au vu du stade de développement "jeune" de la prairie, on s'attendait à un rapport C/N plus faible. Cependant, les graminées ont un C/N plus élevé (Vertès et al., 2015) que les légumineuses et avec près de 20% de graminées dans la prairie, cela peut justifier ce rapport plus élevé qu'attendu.

Justes et al. (2009) font état d'un seuil quant à la minéralisation liée au rapport C/N des résidus végétaux de type engrais vert. Jusqu'à un rapport C/N < 13, il y a minéralisation nette. Alors qu'entre 13 et 20, il y a organisation de l'azote pendant les premières semaines, suivie d'une minéralisation engendrant ensuite une minéralisation nette. D'autres auteurs parlent d'une minéralisation nette rapide et toujours positive dans le cas des légumineuses (Vertès et al, 2015).

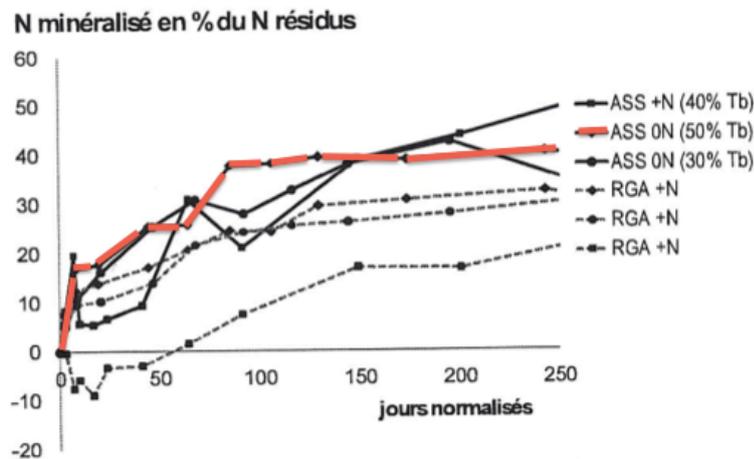


Figure 19 : Le focus est ici sur la courbe rouge qui montre la cinétique de minéralisation de résidus de ray-grass anglais (RGA) associé (ASS) à du trèfle blanc (Tb), sans apport d'azote (0N) (+N = avec azote). Adapté de Vertès et al. (2007) dans Vertès et al. (2015).

Nous retiendrons ici un taux de minéralisation de l'herbe durant la culture correspondant à 40% de l'apport (cf. référence au chapitre 7.2.2).

Farine de plumes

La farine de plumes utilisée, avec un rapport C/N de 4 pour un taux d'azote de 13% de la MS, s'avère un engrais organique concentré et efficace qui minéralise rapidement (Koller, 2005) dans les premiers mois, voire les premières semaines après son application (figure 20). Ceci pour 80% de l'azote organique apporté (David, 2004) ou jusqu'à 82% pour Leclerc (2009b).

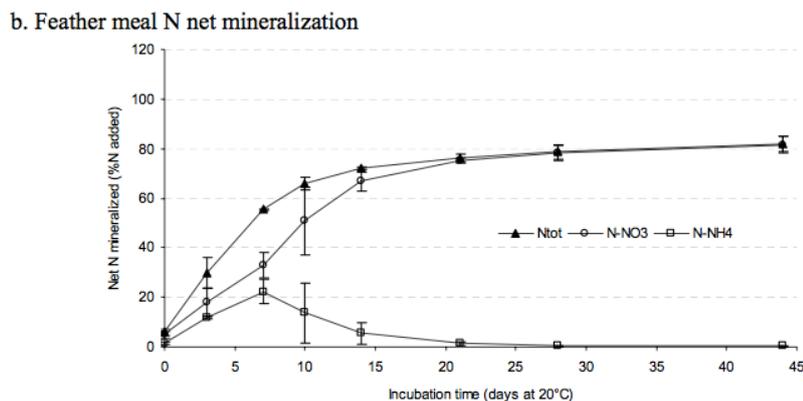


Figure 20 : Cinétique de minéralisation de l'azote et taux de minéralisation de l'azote d'engrais à base de farine de plumes (David, 2004).

Fumier de poules séché

Le fumier de poules séché présentait un rapport C/N de 14 et un taux d'azote de 2,6% de la MS. Le taux de minéralisation de l'azote contenu dans les fumiers de volailles est de 30 à 40% la première année dont au moins la moitié pendant les 50 premiers jours normalisés après l'épandage (Bouthier et Trochard, 2009). La figure 21 présente la courbe de cinétique de minéralisation du fumier de volailles. Il y a un élément auquel il

faut prêter attention, c'est que le fumier de poules séché utilisé contient de la sciure, donc du carbone découpé finement. Celui-ci étant plus facilement dégradable que du carbone grossier, il peut s'avérer consommateur d'azote dans un premier temps. D'autre part, avec son taux d'azote < 3% de la MS, il entre dans la dénomination amendement organique plutôt que dans celle d'engrais organique (Leclerc, 2009b). L'amendement étant principalement utilisé pour un entretien de la fertilité des sols, alors que l'engrais organique est utilisé pour son effet azote sur la culture cible.

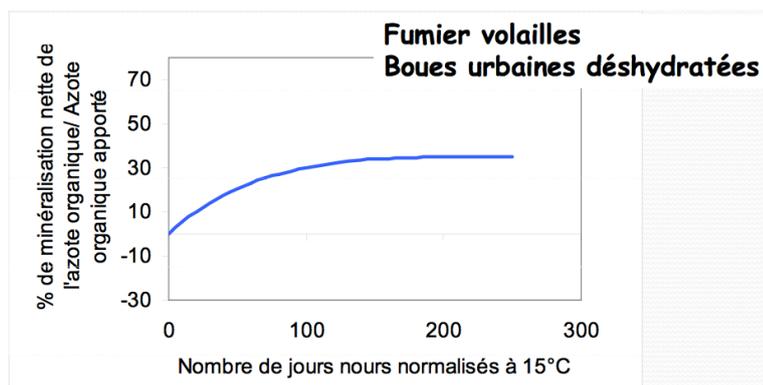


Figure 21 : Cinétique de minéralisation du fumier de volailles (Bouthier et Trochard, 2009).

7.4. Cinétique de minéralisation des engrais et rendement

Ces différentes cinétiques de minéralisation (figures 19 à 21) dues à la "qualité" des produits correspondent respectivement, aux différents rendements obtenus sur l'essai.

7.4.1. Herbe et farine de plumes

La cinétique de minéralisation de l'herbe, ressemble à la cinétique de minéralisation de la farine de plumes. Elles présentent une évolution parallèle, cependant l'herbe ne fournit potentiellement que 40% de l'azote qu'elle contient pour la culture en place, contre potentiellement 80% dans le cas de la farine de plumes (tableau 4).

Tableau 4 : Taux de minéralisation potentiel durant la culture des engrais utilisés dans l'essai selon références des figures 19 à 21.

	% de l'azote organique apporté minéralisé		Cinétique de minéralisation
	à 2 mois	à 6 mois	
Herbe/Résidus végétaux	40	40	rapide
Farine de plumes	80	80	rapide
Fumier de poules	15-25	25-35	lente

Herbe2 qui a reçu le double d'azote que Herbe1 se trouve ainsi théoriquement avec le même potentiel d'azote minéralisé que Plumes. Soit une cinétique de minéralisation de l'azote parallèle rapide et un taux de minéralisation cumulé qui correspond à 83 kg (2*40% de 104 kg), proche de l'apport du procédé Plumes qui est de 88 kg (tableau 5).

Tableau 5 : Mise en parallèle des rendements avec les kg d'azote potentiellement minéralisé provenant de la fertilisation et la minéralisation théorique de l'humus de base.

	Fertilisation kg d'azote	minéralisation potentielle issu de la fertilisation kg d'azote	minéralisation théorique de l'humus de base (selon DBF) kg d'azote	Rendement maïs grain dt	Rendement maïs plante entière dt
Herbe1	104	41	23	37	87
Herbe2	208	83	23	46	104
Plumes	110	88	23	43	95
Poules	110	38	23	30	84

Au vu des meilleurs rendements obtenus par Herbe2, on peut supposer que l'apport net réel d'azote soit supérieur ou alors que la dynamique de minéralisation d'Herbe2 a mieux correspondu aux besoins temporels du maïs (figure 22).

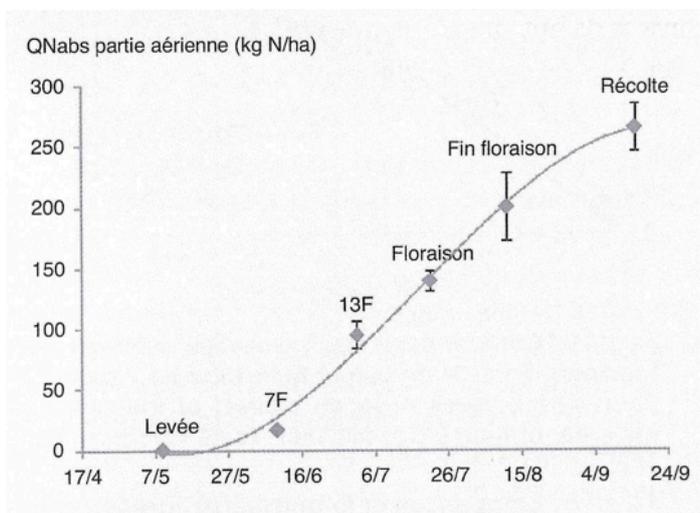


Figure 22 : Courbe d'absorption azotée d'un maïs fourrage (Soënen et Bouthier, 2015).

Herbe1 avec 104 kg d'azote/ha apporté, dont le 40% s'est potentiellement minéralisé pendant la durée d'implantation de la culture a eu un rendement similaire au témoin. Ceci témoigne que ces plus ou moins 41 kg d'azote potentiellement minéralisé (104×0.4) n'ont pas été utiles au rendement pour Herbe1.

Alors que les procédés Herbe2 et Plumes avec respectivement 83 et 88 kg d'azote potentiellement minéralisé durant la culture ont un rendement conséquemment plus important que le témoin.

Cette nette différence de rendement entre Herbe2 et Plumes d'une part en comparaison à Herbe1 et Témoin d'autre part, laisse penser qu'il y a eu un seuil de disponibilité de l'azote pas franchi par Herbe1 avec ses 41 kg d'azote potentiellement minéralisé.

7.4.2. Fumier de poules

Par contre, le fumier de poules séché présente un taux de minéralisation de l'azote durant la culture d'environ 35% et une cinétique de minéralisation de l'azote plus lente que les procédés Herbe et Plumes, pouvant expliquer son rendement le plus faible.

7.4.3. Rendement grain et rendement maïs plante entière

Le rendement en grain du maïs peut être perturbé par un manque d'eau (Arvalis, 2016b) ou par un manque d'azote (Plenet et al., 1991). La période entourant la floraison est une période critique qui voit la conception de l'épi et le nombre de rang par épi se définir jusqu'à la floraison, alors que le nombre de grain par épi se définit juste après jusqu'au stade brunissement des soies (correspondant à la première décade d'août dans notre essai). Le remplissage des grains se fait lui de la floraison à la récolte.

Tous les procédés ont manqué d'eau de la même manière et étaient donc à égalité sur ce point. Par contre les différentes proportions de rendement du maïs grain en comparaison au maïs plante entière pourraient s'expliquer par un seuil critique de mise à disposition de l'azote différent selon les procédés, survenant au moment crucial qui entoure la floraison du maïs.

Dans le cas du fumier de poules, il y a peut-être eu un manque de nutrition azotée à cette période charnière, alors que le reliquat azoté mesuré en sortie d'hiver (120 kg) permettait théoriquement au procédé Poules d'être aussi bien approvisionné en azote pour le démarrage de la culture, que Herbe1 ou le témoin. L'apport potentiel d'azote par la fertilisation du procédé Poules a représenté environ 38 kg d'azote/ha (110×0.35) et était proche de l'apport d'azote potentiel du procédé Herbe1 (41kg) pour un rendement MPE assez semblable, alors que le rendement en grain des deux procédés présente une nette différence. Soit 37 dt pour Herbe1 et 30 dt pour Poules. Cette différence que l'on observe sur le rendement maïs grain et non sur le rendement MPE pourrait aussi être attribuée à la cinétique de minéralisation de l'azote du fumier de poules. Ceci renforce l'idée que le procédé Poules a peut-être réorganisé une part de l'azote dans un premier temps pour permettre la décomposition de la sciure. Ainsi, la potentielle lixiviation printanière ajoutée à l'organisation possible d'azote par ce procédé Poules, contribueraient à expliquer ses plus faibles rendements.

En ce qui concerne les procédés Herbe2 et Plumes, malgré un apport d'azote potentiel similaire, ils ne semblent pas avoir eu l'azote à disposition au même moment. On a vu à la figure 15 que l'herbe avait le meilleur rapport du nombre d'épis sur le nombre de plantes. Ainsi, la fertilisation à base d'herbe a permis au maïs de concevoir plus d'épis, même d'avoir un nombre d'épis avec grain tendanciellement plus important que les autres procédés. Cependant les procédés Herbe n'ont pas le meilleur rapport maïs grain sur maïs plante entière. C'est le procédé Plumes qui à ce rapport le plus important. Ce qui semble traduire un meilleur remplissage des grains pour le procédé Plumes, alors même qu'il a une tendance à avoir moins d'épis que les procédés Herbe.

On peut en déduire que le procédé Plumes a peut-être bénéficié de plus d'azote en fin de cycle. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que la sécheresse a un fort impact sur le nombre de grain par épi et le remplissage des grains.

7.5. Comparaison des résultats avec d'autres essais

Malgré les faibles rendements obtenus cette année 2015, il y a quelques similitudes avec les autres essais menés dans le cadre du projet "Herbe fertilisante" en Suisse.

Pour la comparaison avec l'essai maïs 2014 sur la ferme pilote de Mapraz et les essais céleri de 2013 à 2015 dans la région genevoise, les apports d'azote qui sont pris en compte équivalent à la dose d'azote organique apporté multiplié par son taux de minéralisation potentiel durant la culture. En retenant les taux de minéralisation précédemment cités : 0.4 pour l'herbe, 0.8 pour la farine de plumes et 0.35 pour le fumier de poules séché.

En 2014, l'essai herbe fertilisante précédent celui-ci, uniquement conduit sur maïs grain, avait globalement donné de meilleurs rendements. L'année météorologique 2014 avait été favorable à l'expression des engrais organiques. L'essai avait été mis en place dans la même région, mais sur une autre parcelle.

Contrairement à cette année, c'était la variante Biorga (équivalent Plumes) qui était sorti du lot avec 128 dt/ha de rendement pour un apport potentiel d'azote de 86 kg (108 kg d'azote total apporté avant le semis multiplié par le taux de minéralisation de 0.8 est égal à 86). Les variantes Herbe1dose et Poules obtenaient respectivement 115 et 112 dt de rendement avec un apport potentiel d'azote de respectivement 33 kg ($83 \times 0.4 = 33$) et 23 kg ($67 \times 0.35 = 23$). Le Témoin se situait à 101 dt/ha de rendement.

Avec 113 dt/ha de rendement pour la variante Herbe2doses pour un apport potentiel d'azote de 67 kg ($167 \times 0.4 = 67$), le doublement de dose d'herbe fraîche avait fourni un rendement à 88 pourcent de celui de Biorga ($113/128 \times 100 = 88$), alors qu'il avait bénéficié de 77 pourcent de l'azote que Biorga a potentiellement mis en valeur ($67/86 \times 100 = 77$).

En 2015, le procédé Herbe2 a obtenu un rendement supérieur au procédé Plumes en recevant plus ou moins la même quantité d'azote que ce dernier.

Un essai en maraîchage, sur céleri pomme, a été conduit en parallèle pendant 3 ans, dans la région genevoise. Les mêmes engrais ont été utilisés et ont démontré que sur une moyenne de 3 ans d'essai, l'herbe fraîche apportée comme fertilisant permet les mêmes rendements qu'avec du Biorga indépendamment de la quantité d'azote apportée. La variante utilisant du fumier de poules séché est inférieure de 5 %. Le témoin est lui inférieur de 25% du rendement de Biorga et de Herbe1dose (Tamarcaz, 2015).

Autant dans l'essai maïs 2014 que dans les 3 ans d'essais sur céleri, les quantités d'azote apportées ont été différentes suivant les variantes. Dans l'essai 2015, ces différences d'apports sont petites.

Dès lors, il s'avère intéressant d'établir un coefficient d'utilisation de l'azote pour la part du rendement qui est au-dessus ou au-dessous du rendement du témoin, afin d'établir une relation entre l'azote apporté et la part de rendement qui diffère du témoin. Le témoin correspond au 100% du rendement de base. Le malus ou le minus obtenu par les procédés autres que le témoin est divisé par les kg d'azote apportées à chacun (ces kg d'azote étant multipliés par le taux potentiel de minéralisation pendant la culture).

On observe que pour les deux essais maïs (figure 23), les procédés à base de farine de plumes et l'herbe double dose sont toujours positifs. Alors que le procédé herbe simple dose se trouve positif en 2014 mais proche de l'inefficacité en 2015. Quant au procédé avec du fumier de poules séché, il est positif en 2014 et significativement négatif en 2015.

Il y a une inversion des tendances entre l'herbe une dose et l'herbe deux doses sur les deux années d'essai. Est-ce les nettes différences météorologiques entre ces deux années qui en constituent l'explication ?

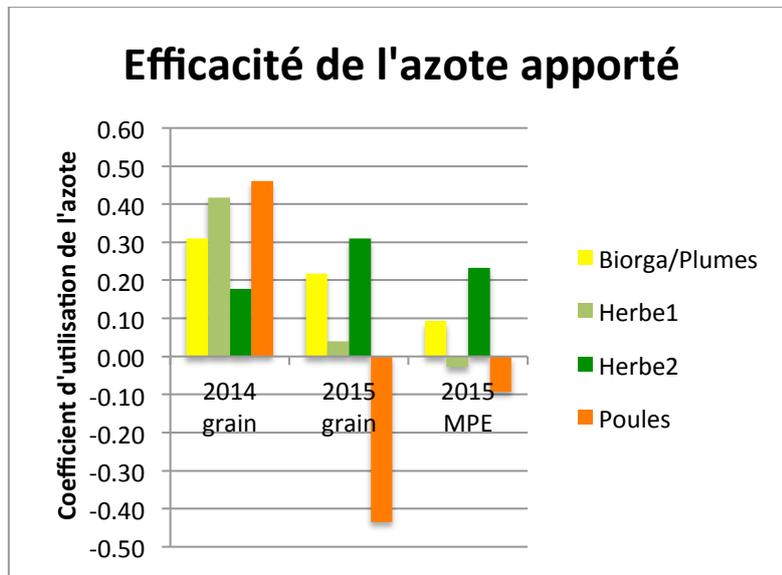


Figure 23 : Coefficient de l'utilisation de l'azote pour les essais maïs. Cela correspond à la part de rendement qui diffère du témoin, divisée par l'apport d'azote potentiellement minéralisé durant la culture.

Etant donné que ce sont les mêmes engrais qui ont été utilisés sur les essais en maraîchage, il peut être utile de confronter les résultats du maïs à ceux des céleris. La figure 24 montre le coefficient d'utilisation de l'azote pour la part du rendement qui diffère du témoin, concernant les céleris et selon le même principe de calcul qu'avec le maïs. On constate que les apports d'engrais sur céleri ont tous été positifs en regard au témoin. On observe même que la variante avec le fumier de poules séché sort avec le meilleur coefficient d'utilisation de l'azote sur céleri. La variante Biorga étant de loin la moins efficace dans ce cas, mais de manière régulière. L'Herbe1dose étant intermédiaire, mais plus proche de la variante Poules, avec une différence bien moins marquée en 2015.

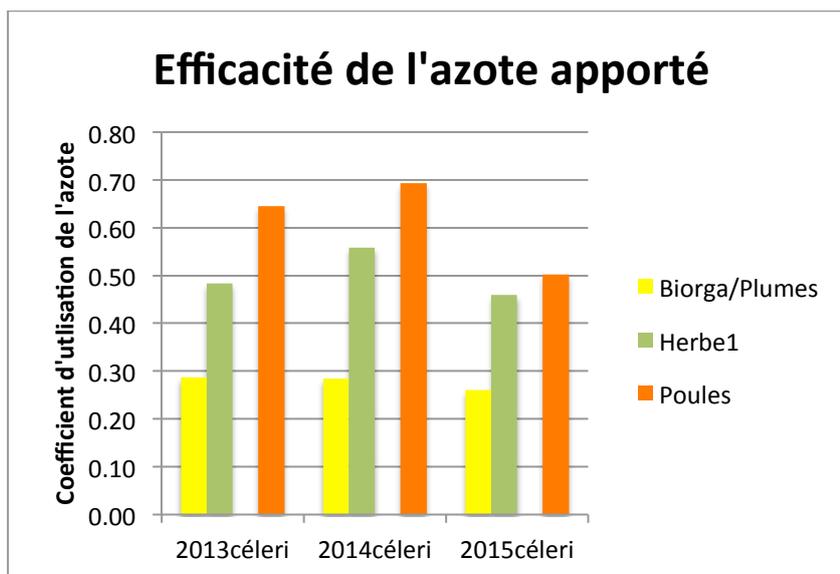


Figure 24 : Coefficient de l'utilisation de l'azote pour les essais céleri. Ce qui correspond à la part de rendement qui diffère du témoin, divisée par l'apport d'azote potentiellement minéralisé durant la culture.

Les variations du coefficient d'utilisation de l'azote apporté sont disparates sur les essais maïs, alors qu'elles sont plus cohérentes sur céleri. Les cultures de céleri ont été irriguées et cela limite certaines différences météorologiques. Ceci démontre toute l'importance de l'eau pour la mise en valeur des engrais organiques. Toutefois, les rendements en céleris ont été nettement plus faibles en 2015.

7.6. Synthèse

Dans les conditions sèches de 2015 et dans les conditions de la parcelle, l'azote a été un facteur moins limitant que l'eau. L'azote apporté ne s'est pas exprimé dans le sol comme on l'attendait et le manque d'eau en été n'a pas permis au maïs d'optimiser l'azote potentiellement disponible. Il reste une interrogation concernant le devenir de cet azote qui s'est potentiellement minéralisé et qui n'aurait pas été utilisé par la culture. Le procédé Herbe1 en témoigne avec son rendement proche du témoin, malgré une fertilisation potentielle d'environ 40 kg d'azote/ha. Des mesures plus approfondies et régulières dans le sol auraient permis de répondre à cette question.

Le taux de minéralisation d'un engrais organique à base de résidus végétaux pour une culture annuelle de printemps est un élément clé dans la gestion du système. Son taux de minéralisation en première année étant inférieur à la farine de plumes, il faut doubler la dose d'herbe fraîche à apporter pour obtenir un rendement sensiblement supérieur aux engrais à base de farine de plumes, sur un cycle annuel. Cependant, dès la deuxième année sur la même parcelle qui a reçu l'herbe comme fertilisant l'année 1, la simple dose (équivalent 110 kg d'azote total) peut suffire. Puisqu'il y a le solde de l'azote (100%-40%) qui ne s'est pas minéralisé l'année 1, qui se minéralise en partie l'année 2. Ainsi, le pourcentage de minéralisation potentielle (40%) de l'apport en année 2 se chevauche avec la minéralisation potentielle de l'azote restant de l'année 1 (60%).

Il apparaît que le bilan de l'apport de résidus végétaux ne doit pas être réfléchi annuellement, mais bien pluriannuellement au sein du système. L'arrière-effet de ces apports ayant été démontré (Triboï et Triboï-Blondel. 2008; Wiens et al., 2006).

Les résultats obtenus semblent traduire une mise à disposition de l'azote différente selon les engrais organiques utilisés et questionnent sur le moment opportun de l'apport d'herbe comme fertilisant, du moins dans les conditions de l'essai 2015.

Pour un effet fertilisant de la pratique dans un temps court, il est primordial d'incorporer de la biomasse à forte teneur en azote et avec un rapport C/N faible. A contrario un rapport C/N élevé fixe du carbone et organise l'azote dans un premier temps, mais enrichi le sol en ces deux éléments, augmentant sa fertilité et son potentiel. Les deux sont complémentaires et nécessaires à long terme.

7.7. Pistes d'exploration

La réalisation de cet essai nous a ouvert à esquisser quelques pistes qui pourraient être développées lors d'un prochain essai de fertilisation à base d'herbe. Comme de mieux caractériser la cinétique de minéralisation de l'herbe incorporée au sol, confirmer le taux de minéralisation de l'herbe suivant les conditions météorologiques, de définir le moment opportun de l'apport en fonction de la culture, d'expérimenter le nombre d'apports ou la complémentarité entre différents apports organiques, tester des apports à faible intrant ou établir un essai pluriannuel pour éprouver l'effet engrais et amendements organiques à moyen terme.

La caractérisation de la cinétique de minéralisation de l'herbe permettrait de mieux situer les apports, en correspondance avec les besoins ciblés de la culture et de restreindre au maximum les pertes potentielles d'azote.

La confirmation du taux de minéralisation de l'azote de l'herbe suivant sa composition botanique permettrait de confirmer les quantités d'herbe à épandre.

En apport de printemps sur maïs biologique, l'apport d'herbe dans un délai de quatre semaines avant le semis semblait cohérent. L'essai 2014 d'herbe fertilisante sur maïs dans des conditions météorologiques favorables le montre, mais laisse aussi entrevoir que cela peut être amélioré. Ainsi il serait judicieux de faire l'essai d'un apport plus précoce et d'un apport plus tardif que ce qui a été réalisé ici, respectivement 6-7 semaines et 2 semaines avant le semis du maïs.

La fertilisation à base d'herbe pourrait être intéressante à expérimenter en dédoublant l'apport. Ce qui décalerait la mise à disposition de l'azote. Soit une partie avant l'hiver, avec l'incorporation de la dernière repousse d'herbe à l'automne par une rompu avant mise en culture. Cumulant l'effet de la rompu et celui de l'apport de biomasse fertilisante. Le deuxième apport se ferait en sortie d'hiver avant le semis et proviendrait d'une autre parcelle fauchée.

Une autre alternative conjuguerait un apport d'herbe fraîche avec un apport de fertilisant organique différent (fumier, lisier, EOC) présentant une cinétique de minéralisation complémentaire.

De plus la réflexion s'est jusqu'à présent focalisé sur un apport unique, quantifié selon les normes officielles, pour un rendement annuel défini. Les farines de plumes sont concentrées en azote et conçue pour avoir un mécanisme fertilisant rapide, qui correspond à cette méthode. Toutefois, les résidus végétaux ne fonctionnent pas de manière aussi régulière et nécessite certainement un autre raisonnement de fertilisation, correspondant à leurs propres dynamiques de décomposition.

Ceci nous fait suggérer que sur un sol fertile et biologiquement actif, des apports annuels d'herbe fertilisante pourraient être considérés avec un apport d'azote réduit, mais de manière régulière chaque année.

L'expérimentation d'un essai pluriannuel sur une même parcelle apparaît très important au vu des nombreux paramètres qui entrent en jeu et pourraient contribuer à préciser le fonctionnement de l'herbe comme fertilisant en intégrant les arrières-effets de l'azote apporté. Le long terme pourrait aussi renseigner sur un besoin potentiel d'adaptation du statut organique du sol et de son activité biologique à ce système.

Une expérimentation plus approfondie des effets de la prairie temporaire cumulés aux apports d'herbe fraîche comme fumure, permettrait aussi de cerner la fonction du principe "herbe fertilisante" sur l'entretien ou l'accroissement de la teneur en matière organique et en humus du sol, ainsi que la stimulation de l'activité biologique du sol.

Cet essai 2015 s'est focalisé sur le rendement en lien avec l'azote apporté. Toutefois il ne faut pas oublier tous les autres nutriments qui sont contenus dans les différents engrais organiques, qui nécessiteraient d'être intégrés au bilan du système.

Une approche sous forme de comparaison avec l'épandage des effluents d'élevage dont la pratique est généralisée en Suisse, tendrait à rendre ce principe d'herbe fertilisante plus accessible. Elle offrirait aussi la possibilité de confronter plus spécifiquement les contraintes écologiques de mise en œuvre et d'entretien ou d'amélioration des conditions du sol.

Un bilan complet du système au sein d'une exploitation serait une approche complémentaire et indispensable à l'évaluation du principe. Il permettrait de connaître précisément les entrées et les sorties des différents nutriments. Que ce soit dû à la présence de prairies dans les rotations ou à l'apport d'herbe fraîche comme fertilisant.

Enfin, un bilan écologique ou énergétique des différents procédés serait très pertinent et en phase avec le sujet. Il donnerait une vision plus large du système dans son intégration au sein des échanges nationaux ou internationaux de ressources et de marchandises. Ce peut être sous forme d'un bilan carbone, d'un bilan calorique ou d'une analyse de cycle de vie par exemple.

7.8. Procédés compost

Les 2 variantes compost n'ont pas été mises en valeur du fait qu'il n'a subsisté qu'une répétition lors de notre essai. Cependant, à titre indicatif, nous pouvons dire que sur cette unique répétition valide, les variantes Compost1 et Compost2 n'ont pas été satisfaisantes. Tamarcaz (2014) conclut lors de l'essai 2014 sur maïs à Mapraz que le compost est moins efficace que les autres variantes. Les essais réalisés dans le réseau français cité au point 4.7. avec une modalité pseudo-compost de luzerne ont été abandonnés après la première année d'essai.

Malgré cela, il ne nous est pas possible de répondre à la question de recherche posée dans ce travail concernant l'utilisation d'un compost d'herbe, comme moyen de conserver un potentiel fertilisant azoté, qui soit concurrentiel vis-à-vis des Engrais Organique du Commerce pour une culture de maïs.

8. TECHNICITE DE LA METHODE

La mise en place de la fertilisation a été réalisée avec les moyens techniques en présence.

Pour l'herbe : une faucheuse à fléaux, deux tracteurs, une remorque, une épanduse à fumier et un chargeur télescopique ont permis la récolte et l'épandage. Les EOC ont été épandus à la main sur l'essai. L'incorporation au sol des engrais organiques a été faite avec un passage de déchaumeur à pattes d'oie sur tout le dispositif.

Pour l'analyse, trois techniques de récoltes de l'herbe ont été retenues. A savoir l'utilisation d'une faucheuse à fléaux, d'une combinaison faucheuse frontale avec autochargeuse et d'une ensileuse automotrice. Concernant les EOC, c'est la technique d'épandage avec un semoir à engrais qui a été évaluée, conformément à ce qui se ferait dans la pratique agricole.

L'ensemble de l'analyse sur la praticité du système et les besoins en main-œuvre ont été ramenés à l'équivalent d'une surface d'un hectare fertilisé.

8.1. Récolte et épandage de l'herbe

L'herbe a été fauchée avec une faucheuse à fléaux, soufflée sur une remorque en parallèle. Cette opération a nécessité deux tracteurs et deux chauffeurs. Il aurait été possible d'atteler la remorque à la récolteuse pour n'avoir qu'un opérateur et seulement un tracteur.

L'herbe a été ensuite déchargée au sol, puis rechargée sur une épanduse à fumier à l'aide d'un chargeur télescopique. Le matériel a été épandu sur la terre ouverte préalablement travaillée, un mois avant le semis du maïs. Lors de l'épandage, les principales difficultés concernaient la gestion de la valeur fertilisante du matériel à

épandre (teneurs en éléments) et le réglage de la machine. Le sol en non-labour et bien sec n'a pas laissé de traces profondes au passage de l'épandeuse, il n'y avait pas non plus de traces résiduelles visibles sur la culture.

Cependant, ce passage avec une machine lourde, potentiellement chargée, sur une terre ouverte et non-ressuyée à certaines périodes, est un point qui n'est pas à négliger. Un apport avant labour, comme pour l'épandage du fumier, serait à tester pour limiter le tassement du sol. L'épandage des EOC, fait avec un semoir à engrais dans la pratique agricole, est moins dommageable pour le sol et nécessite moins de passages de tracteur.

L'herbe jeune hachée et riche en azote a permis d'épandre une fine couche de matériel qui s'est facilement incorporé au passage du déchaumeur. L'incorporation devrait être effectuée le plus rapidement possible après l'épandage. Pour des raisons pratiques, dans les conditions de l'essai, cela a été effectué le lendemain. Une herbe moins riche, qui demanderait plus de matière à épandre pour le même apport en azote, pourrait demander un passage d'outil animé avec la prise de force pour une bonne incorporation. Cela dépend aussi de la longueur des brins d'herbe hachée (Tamarcaz, 2014).

8.2. Adaptation de la technique

La technique utilisée lors de l'essai peut être simplifiée et d'autres techniques de récolte peuvent être mises en œuvre, en fonction du parc machine à disposition de l'agriculteur. L'important est d'obtenir un fourrage découpé finement, afin de faciliter l'incorporation au sol. Nous avons ainsi retenu trois différentes techniques dont voici la description :

- Premièrement ce peut être en soufflant l'herbe avec une faucheuse à fléaux directement dans une épandeuse, pour autant que cette dernière ne soit pas trop lourde pour le terrain. La largeur récoltée conditionne le nombre de passage et peut nécessiter beaucoup d'aller-retour sur le terrain. Cette manière de procéder permet d'éviter la phase de rechargement du matériel vidé au sol.
- Deuxièmement, l'utilisation d'une ensileuse automotrice qui souffle le fourrage dans une épandeuse, s'avère intéressante pour les grandes surfaces à récolter.
- Troisièmement, une faucheuse frontale devant le tracteur et une autochargeuse derrière. L'autochargeuse doit être munie d'un maximum de couteaux pour couper le fourrage assez finement, comme pour l'ensilage.

La décharge de l'herbe au sol allonge la chaîne de mécanisation et la renchérit.

L'épandage de l'herbe semble le plus pratique avec une épandeuse. En fonction de la longueur de la parcelle, une machine qui épand large permet de limiter le nombre de passage.

En maraîchage, en plate-bande et chemin permanent, le matériel peut-être épandus sur les cultures depuis les chemins avec une épandeuse latérale. Voire même, les chemins enherbés pourraient être fauchés avec une faucheuse à fléaux et directement soufflés

sur les cultures à proximité comme cela a été fait dans un essai finlandais (Schäfer et al., 2001).

8.3. Main d'œuvre

Les calculs ont été effectués avec les références des "Coûts-machines 2015" d'Agroscope (Gazzarin, 2015) et pourront différer selon les machines utilisées et les débits de chantier réalisé. Les heures ont volontairement été comptées dans le haut de la tranche d'utilisation, afin d'intégrer une marge de manœuvre qui soit comptabilisée dans les coûts.

Le temps de travail pour la mise en œuvre de l'herbe selon ces trois méthodes est similaire. Il représente environ 5 heures de travail pour fertiliser 1 ha à base d'herbe, alors que pour les engrais organiques du commerce, il faut environ 1.25 heure.

8.4. Rapport surface d'herbe récoltée et surface de culture

L'herbe récoltée tôt dans la saison le 21 avril, à un stade de développement phénologique ADCF 2, ne constituait pas encore une biomasse importante. Pour fertiliser 1 hectare de culture de la même manière que l'essai a été fertilisé (110 kg d'azote/ha), il aurait fallu faucher 1,5 hectares de la prairie temporaire dont nous disposions.

8.5. Synthèse

La méthode de fertilisation à base d'herbe demande une mécanisation plus conséquente que pour l'épandage des EOC, cependant elle peut être réalisée avec des machines existantes dans les campagnes suisses. La demande en main d'œuvre est aussi plus importante pour la méthode herbe fertilisante que pour les EOC. Ces différences d'équipements et de travail correspondent en partie aux différences d'exécution connues entre la fertilisation minérale en agriculture conventionnelle et l'épandage des engrais de ferme. L'épandage d'herbe comme fertilisant n'apporte pas de nouvelles contraintes différentes à celles liées à l'épandage d'effluents d'élevage, tel que le lisier ou le fumier, pour lesquels de lourdes machines sont aussi utilisées et les besoins en main-d'œuvre sont aussi conséquents.

9. COUT FINANCIER DE LA METHODE

Les coûts des procédés ont été calculés en séparant la valeur des engrais organiques d'une part, des coûts des machines additionnés des coûts de la main-d'œuvre d'autre part, le tout extrapolé à un hectare fertilisé.

9.1. Coûts des engrais organiques

Les tarifs pour les EOC correspondent au prix d'achat 2015 en "Big-Bag".

La valeur de l'herbe épandue a été calculée selon les recommandations de l'Institut agricole de l'Etat de Fribourg (Grangeneuve, 2015), correspondant aux prix d'achat des fourrages sur pied communiqué par l'Union Suisse des Paysans (USP) multiplié par un facteur tenant compte de la qualité de l'herbe (avec des conditions optimales d'utilisation et une bonne composition botanique). Cette valeur selon la qualité, double plus ou moins le prix de références de l'USP. La prairie qui a fourni l'herbe à un stade jeune était riche en légumineuses, particulièrement en luzerne.

La farine de plumes et le fumier de poules séché présentent un coût de l'engrais plus élevé que la valeur de l'herbe, avec de grandes différences de prix observées sur le produit brut (figure 25, en bleu foncé). Cependant, l'herbe et le fumier de poules séché, à quantité d'azote égale, contiennent plus d'autres éléments fertilisants (tableau 6).

Tableau 6 : Quantité en kg par hectare, des différents éléments constituant les engrais épandus sur l'essai pour une fertilisation de base correspondant à un apport d'azote de 110 kg/ha.

	Unités épandues en kg		
	Plumes	Poules	Herbe
N	110	110	110
P2O5	9	183	24
K2O	13	120	83
Ca	5	440	56
Mg	1	27	7

Aussi, nous avons déduit du prix du produit brut, les valeurs pécuniaires du phosphore (P) et de la potasse (K) contenues dans les deux EOC et l'herbe. Cela n'a pas été fait pour le calcium (Ca), ni le magnésium (Mg) par manque de prix de références pour ces deux éléments. Après déductions faites des valeurs du phosphore et du potassium, les différences financières restent, mais rendent les procédés de fumier de poules séché et d'herbe plus attrayants financièrement face au procédé à base de farine de plumes (en bleu clair sur la figure 25).

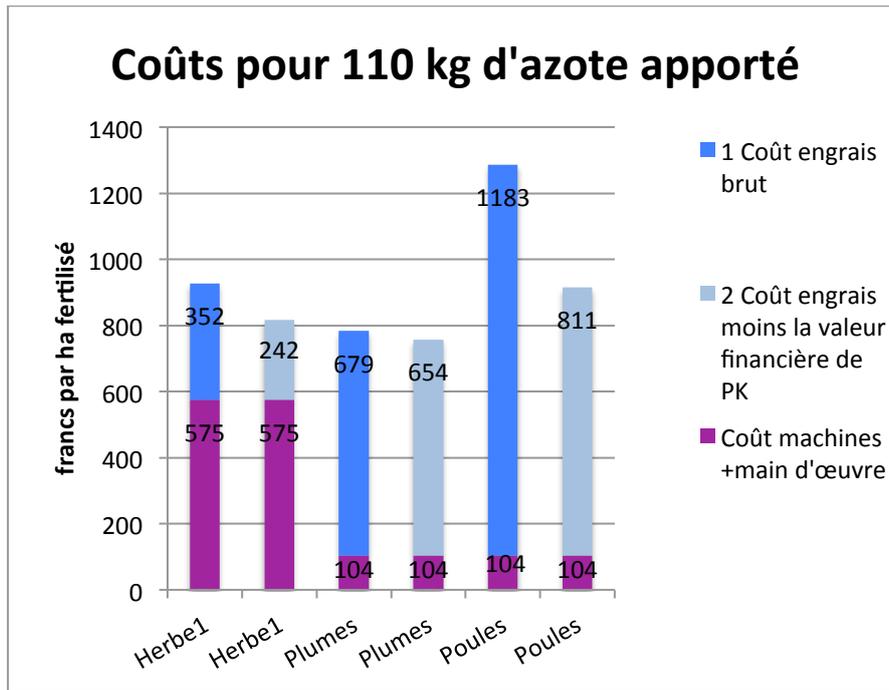


Figure 25 : Coûts de mécanisation additionnés des coûts de main d'œuvre en rose. Coûts bruts des différents engrais organiques utilisés en bleu foncé. Le bleu clair correspond aux coûts de l'engrais après avoir déduit la valeur financière du phosphore (P) et de la potasse (K).

9.2. Coûts machines et main-d'œuvre

Les coûts de mécanisation et de travail horaire ont été calculés à l'aide des références "Coûts-machines 2015" d'Agroscope (Gazzarin, 2015) et sont présentés à la figure 25.

La distribution spatiale des deux EOC induit plus ou moins les mêmes coûts, étant donné la similarité des deux produits. Il y a toutefois une grande différence de densité azotée des produits, nécessitant plus de manutention pour le fumier de poules séché. Les coûts comprennent le tarif hectare pour le semoir à engrais et le tarif horaire pour le tracteur et le chauffeur. La rémunération du chauffeur a été comptée à Fr. 28.- de l'heure.

Les coûts pour la récolte et l'épandage de l'herbe ont été comptabilisés selon le même principe que pour les EOC, tarif hectare ou nombre de charge à l'heure pour les machines et tarif à l'heure pour le tracteur et le chauffeur. L'étape d'incorporation de l'herbe avec un déchaumeur a été comptabilisé pour les procédés Herbe, mais il peut dans certains cas faire partie de l'itinéraire cultural prévu ou nécessaire avant le semis. Ce qui diminuerait les coûts des procédés Herbe.

9.3. Synthèse

Dans cet essai, les coûts de mise en œuvre de la fertilisation à base d'herbe sont conséquents et plus chers que ceux pour la fertilisation à base de farine de plumes ou de fumier de poules séché. Cependant, l'important coût d'achat des engrais organiques du commerce atténue ces différences. En déduisant du coût des produits bruts, la valeur

fertilisante du phosphore et du potassium, les différences s'atténuent encore pour rendre les coûts de la fertilisation à base d'herbe proche des coûts de la fertilisation avec de la farine de plumes, mais légèrement supérieurs. Les coûts de la fertilisation avec du fumier de poules séché restent dans notre cas les plus importants.

Tableau 7 : Récapitulatif chiffré des coûts de fertilisation des différents engrais en francs par hectare fertilisé et du nombre d'heures nécessaires pour la mise en place de la fertilisation.

	herbe	farine de plumes	fumier de poules séché
Coût brut des engrais (fr.)	352.-	679.-	1183.-
Coût de la mécanisation (fr.)	445.-	69.-	69.-
Coût de la main-d'œuvre (fr.)	130.-	35.-	35.-
Total (fr.)	927.-	783.-	1287.-
Heures de travail	5 h	1.25 h	1.25 h

10. L'HERBE FERTILISANTE FACE A LA TRADITION

La description du principe de fertilisation des grandes cultures avec de l'herbe suscite lors de son évocation un étonnement et une contestation quant à l'idée elle-même. En effet, les ressources permettant de produire de la nourriture sont comptées et on ne saurait tolérer un gaspillage de la matière première "herbe" qui sert à produire des produits laitiers et de la viande. Ceci est d'autant plus flagrant dans un pays d'herbages et d'élevage comme la Suisse. La valorisation des herbages par le bétail n'est évidemment pas à remettre en cause et il ne s'agit pas de soustraire l'herbe à l'alimentation des animaux.

Le bétail a quitté la plaine par région (surtout dans l'ouest de la Suisse), ce qui rend les prairies économiquement moins intéressantes dans les zones de grandes cultures. Hors dans une rotation culturale, la prairie fournit une autre prestation primordiale qui est le maintien de la fertilité des sols. Un sol en perte de fertilité n'est pas voué à produire longtemps. Dès lors il est nécessaire de trouver une alternative qui permette de maintenir les prairies aussi en plaine. Ainsi nous voyons plutôt dans la fertilisation à base d'herbe, un complément à l'utilisation d'herbe comme fourrage, la rendant plus attrayante dans les zones de grandes cultures.

Sous l'angle du système agricole, l'autonomie azotée d'un cycle cultural préoccupe les agriculteurs biologiques, et la fixation symbiotique d'azote par les légumineuses des prairies peut rendre ce service. Le cycle global de l'azote s'en trouve amélioré.

D'un point de vue fertilisation, il est actuellement fait usage d'engrais organiques du commerce qui proviennent principalement d'excréments ou de déchets animaux. Du moment qu'ils ont été produits, il est légitime de les utiliser. Cependant, une alternative

végétale aux déchets animaux s'avérera trouver un sens à l'avenir auprès de nombreux consommateurs et agriculteurs soucieux de voir évoluer notre rapport aux animaux.

Sans entrer dans les détails, le problème de l'alimentation mondiale n'est pas tant dans la production de nourriture, que dans la répartition géographique et les moyens pour se la procurer. Avec la croissance démographique, nous devons certainement reconsidérer nos productions agricoles et surtout notre alimentation. La segmentation entre les productions de plaine et de montagne pourrait s'accroître et voir la production animale se concentrer sur les terrains en pente et la production végétale augmenter et s'accroître en plaine.

11. CONCLUSIONS

L'expérimentation a montré que les procédés Herbe1 et Poules, avec un équivalent fertilisation potentiellement utile pour la culture de respectivement 41 et 38 kg d'azote/ha apporté un mois avant le semis du maïs, ont des rendements maïs plante entière similaire. Toutefois le procédé Herbe1 obtient un meilleur rendement en maïs grain que le procédé Poules. Ce qui dans nos conditions d'essai et à quantité d'azote similaire, rend l'herbe concurrentielle par rapport au fumier de poules séché.

Le procédé Herbe2, avec un équivalent azote potentiellement utile pour la culture de 83 kg apporté en une fois, un mois avant le semis, a le meilleur rendement aussi bien en maïs grain qu'en maïs ensilage et a permis dans les conditions de l'essai de concurrencer l'engrais à base de farine de plumes, qui a lui reçu un équivalent d'azote potentiellement utile de 88 kg.

Ainsi, la fertilisation à base d'herbe dans les conditions de notre essai a concurrencé les deux engrais organiques du commerce proportionnellement au taux de minéralisation potentielle de l'azote apporté à chacun.

Les procédés Herbe1 et Poules avec un équivalent fertilisation potentiellement utile pour la culture d'environ 40 kg d'azote/ha apporté, ont des rendements plus ou moins proche du témoin qui n'a reçu aucune forme d'azote. La fertilisation azotée apportée sur ces 2 procédés n'a donc pas eu d'effet conséquent sur le rendement.

Une partie de l'azote supplémentaire apporté sur les procédés Herbe2 et Plumes a été valorisée, nous amenant à suggérer qu'il y a eu un seuil de disponibilité de l'azote bien distinct entre les procédés ayant reçu une simple ou double quantité d'azote selon l'apport initial et leur taux de minéralisation respectif. Ceci malgré les conditions météorologiques particulières de l'année 2015, marquée par une importante sécheresse estivale en plus de températures caniculaires.

En ce qui concerne le compost, une partie des procédés fertilisés avec du compost n'ont pas poussé, dû à leur répartition géographique pénalisante, trop près d'une haie qui a marquée très fortement ses abords pendant la période de sécheresse. Ainsi nous ne

pouvons répondre à l'hypothèse selon laquelle le compost, comme moyen de conserver un potentiel fertilisant de produits de prairies temporaires est concurrentiel vis-à-vis des engrais organiques du commerce.

L'essai a aussi permis d'observer qu'il est techniquement réalisable de fertiliser les grandes cultures à base d'herbe, mais que cela nécessite une importante mécanisation et mise en œuvre, renchérissant en conséquence la méthode. Le principe d'herbe fertilisante s'avère un peu plus cher que la fertilisation à base de farine de plumes et moins cher que celle avec du fumier de poules séché. Le principe est accessible pratiquement pour une exploitation de grandes cultures biologiques suisse et s'apparente pratiquement et financièrement à l'épandage des engrais de ferme communément utilisé dans les régions d'élevage, mais qui peuvent faire défaut dans les régions où les grandes cultures prédominent.

Quant à savoir si l'utilisation d'herbe pour fertiliser les cultures est défendable dans un pays à tradition d'élevage, nous laisserons évidemment chacun se faire son avis. Nous considérons cependant que le procédé de fertilisation des cultures avec de l'herbe offre une alternative à l'utilisation de fertilisants externes à l'exploitation, améliorant l'autonomie azotée de celle-ci et limitant sa dépendance au marché des fertilisants. De plus, nous estimons qu'elle représente une opportunité d'innovation intéressante sur les techniques en production végétale pour une adaptation à l'évolution agro-environnementale des systèmes.

12. BIBLIOGRAPHIE

Arrêté N°2015-DRIEE-056 - 2015. Arrêté définissant le référentiel régional de mise en oeuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Ile-de-France. Paris, 29 avril 2015.

Arvalis - 2015. Ajuster la dose d'engrais azoté à la parcelle. <http://www.arvalis-infos.fr/view-12512-arvarticle.html?region=&theme=123> consulté le 8 janvier 2016.

Arvalis - 2016a. Semis de maïs, soigner l'implantation pour garantir une bonne levée. <http://www.arvalis-infos.fr/semis-de-ma-s-2015-soigner-l-implantation-pour-garantir-une-bonne-leeve-@/view-18426-arvarticle.html> consulté le 15 février 2016.

Arvalis - 2016b. Floraison du maïs, le manque d'eau se fait sentir. <http://www.arvalis-infos.fr/floraison-des-ma-s-le-manque-d-eau-se-fait-sentir-@/view-19312-arvarticle.html> consulté le 15 février 2016.

Aubert, C.; Glachant, Ch.; Weber, JP. - 2013. Résultats des essais Grandes cultures bio en Ile de France - Campagne 2012-2013. Fertilisation avec des produits à base de luzerne.

Baudoin, N.; Tournebize, J.; Ruiz, L.; Constantin, J.; Justes, E. - 2012. Nitrate et eau en période d'interculture. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires. Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. INRA.

Bertrand, S.; Menu, P.; Salitot, G. - 2011. Fertiliser le maïs autrement... Agricultures et Territoire. Chambre d'agriculture Picardie.

Billy, L. - 2009. Mise en place d'un outil de gestion de l'azote pour le blé tendre en système de grandes cultures biologiques en zone centre. Journée technique Grandes Cultures biologiques : Azote, matières organiques et engrais verts. Rentabilité des systèmes de grandes cultures en AB. 23 mars 2009. ITAB - ARVALIS-Institut du Végétal.

Bio Suisse - 2015. Cahier des charges pour la production, la transformation et le commerce des produits Bourgeon. Partie II Directives pour la production végétale et animale en Suisse - 2 Directives générales pour la production végétale.

Boissière, M. - 2008. Technique et usages du billon chez les Yali de Papouasie-Occidentale. Agricultures singulières. Institut de recherche pour le développement. Paris, 2008.

Bouthier, A.; Trochard, R. - 2009. Prise en compte de l'effet azote des produits organiques (PRO) appliqués à l'automne, dans la méthode du bilan azoté. ARVALIS. Conférence azote SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes-ARDON-1er octobre 2009.

Bouthier, A.; Trochard, R.; Parnaudeau, V.; Nicolardot, B.; Morvan, T. - 2009. Valeur fertilisante azotée des produits résiduels organiques : mieux prendre en compte la dynamique de la fourniture d'azote. Résumé d'intervention au colloque Académie

d'Agriculture COMIFER du 17 mars 2009, présenté a la Journée Technique Grandes Cultures biologiques ITAB/Arvalis - 23 mars 2009.

Chauvel, A.-L.; Herody, Y. - 2014. Des pratiques innovantes et réalisables sur les fermes d'IDF pour gagner en autonomie sur la fertilisation ? Communication interne.

COMIFER - 2002. Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles. Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture. Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée, groupe azote, juin 2012.

COMIFER - 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée.

David, C. - 2004. Le blé en agriculture biologique. Diagnostic agronomique et raisonnement de la fertilisation azotée de printemps. INRA-INA.

Dragon, S.; Icard, C - 2010. Effet d'apport de différents amendements organiques sur les propriétés du sol - Bilan de 15 années d'essai en culture légumière à la SERAIL. Echo-MO no 81 - janvier février 2010.

FiBL et Bio Suisse - 2013. Les principes de la fertilité des sols. Construire sa relation avec le sol. Forschung institut für Biologisch Landwirtschaft. Bio Suisse.

Gazzarin, C. - 2015. Coûts-machines 2015. Agroscope Transfer N°90/2015. Septembre 2015. Agroscope.

Gebhard, C-A. - 2012. Screening de légumineuses pour couverts végétaux : développement des biomasses et fixation azotée. Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, HAFL.

Grangeneuve - 2015. Prix de l'herbe sur pied. Institut agricole de l'Etat de Fribourg. <http://www.beratung-fr.ch/index.php/fr/documentation/production-vegetal/47-techniques-de-production/339-prix-de-l-herbe-sur-pied> consulté le 15 janvier 2016.

Henrotte, B.; Grogna, F. - 2014. Quelle fertilisation en agriculture biologique. Itinéraires BIO, no 19, 11-12/2014.

Jäger, M.; Clerc, M.; Dirauer, H.; Tamarcaz, J. - 2013. Fertilisation en culture biologique. Agridea.

Justes, E.; Mary, B.; Nicolardot, B. - 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. Plant and Soil. December 2009.

Koller, M. - 2005. Wirkung von organischen Handelsdünger bei frühem Brokkoli. Forschungsinstitut für biologischen landbau Frick, FiBL, Schweiz.

Leclerc, B. - 2009a. La question des engrais organiques azotés en grandes cultures biologiques. Journée technique Grandes Cultures biologiques : Azote, matières organiques et engrais verts. Rentabilité des systèmes de grandes cultures en AB. 23 mars 2009. ITAB - ARVALIS-Institut du Végétal.

Leclerc, B. - 2009b. Fiche technique : la fertilisation organique. Journée technique Grandes Cultures biologiques : Azote, matières organiques et engrais verts. Rentabilité des systèmes de grandes cultures en AB. 23 mars 2009. ITAB - ARVALIS-Institut du Végétal.

Loiseau, P.; Louault, F.; Carrère, P.; Assmann, T; Alvarez, G.; Delpy, R.; Soussana, J.F. - 2002. Flux de carbone et d'azote dans les associations de graminée et de trèfle blanc conduites en pâturage simulé. Fourrages, 169, 25-46.

Mazollier, C.; Védie, H. - 2008. Les engrais verts en maraîchage biologique. GRAB.

OFAG - 2014. Rapport agricole 2014. Résumé. Office fédéral de l'agriculture. Berne 2014.

Oost, JFr.; De Toffoli, M. - 2012. Fertilisation du maïs en 2012 : rendement optimum, reliquats et coûts minimum ! CIPF/UCL-ELla

Piutti, S.; Romillac, N.; Chanseume, A.; Slezack-Deschaumes, S.; Manneville, V.; Amiaud, B. - 2015. Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols. Actes des journées de l'AFPF, La fertilité des sols dans les systèmes fourragers, 8-9avril 2015.

Plénet, D., Lubet, E., Desvignes, P., Sombrun, F. - 1991. Fertilisation azotée et composantes du rendement du maïs : effets des niveaux et des modalités d'apport. Physiologie et production du maïs. Pau (France), 13-15 novembre 1990. AGPM, INRA.

Plénet, D. - 1995. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Institut National Polytechnique de Lorraine. INRA - Bordeaux.

Poupeau, J.-M. - 2012. Fertilisation azotée. A la recherche de l'autonomie. Biofil N° 82, juillet-août 2012.

Recous, S.; Chabbi, A.; Vertès, F.; Thiébeau, P.; Chenu, C. - 2015. Fertilité des sols et minéralisation de l'azote : quels processus sont impliqués ?, quelles interactions sous l'influence des pratiques culturales ? Actes des journées de l'AFPF, La fertilité des sols dans les systèmes fourragers, 8-9avril 2015.

Ryckmans, D. - 2012. 2 exploitations bios très innovantes dans le Sud-ouest des Pays-Bas. Fiwap-Info N° 130, juillet-août 2012.

Schäfer, W.; Väisänen, J.; Pihala, M. - 2001. Technique of green mulch spreading. Viherkatteen levitystekniikka.

Sinaj, S.; Richner, W.; Flisch, R; Charles, R. - 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. Revue suisse d'agriculture, 41 (1), 65.

Soënen, B.; Bouthier, A. - 2015. Raisonement de la fertilisation azotée du maïs fourrage : un levier pour améliorer sa production et sa qualité. Actes des journées de l'AFPF, La fertilité des sols dans les systèmes fourragers, 8-9avril 2015.

Storch, J. - 2012. Culture de salades et de choux : différents types de paillage (mulch) et les techniques employées. Mulcheinsatz im Gemüsebau der SAG-Gesundkost.

Tamarcaz, J. - 2011. Fumure azotée des grandes cultures bios sans bétail. Agridea, Lausanne.

Tamarcaz, J. - 2014. Projet "herbe fertilisante" : Rapport d'essai de fumure sur maïs. Agridea. Bio Suisse.

Tamarcaz, J. - 2015. Herbe fertilisante. Essai de fumure sur céleri 2013 à 2015. Agridea. Bio Suisse

Triboi, E.; Triboi-Blondel, A.-M. - 2008. Systèmes de culture autonomes en azote et en énergie, réalité ou utopie ?. Colloque international Agriculture et changement climatique. Enta Clermont, France, 17-18 avril 2008.

Vericel, G. ; Minette, S. - 2010. Mieux gérer l'interculture pour un bénéfice agronomique et environnemental. Légumineuses, comment les utiliser comme cultures intermédiaires ? Synthèse des travaux menés par la Chambre Régionale d'Agriculture sur la gestion de l'interculture et présentation des références régionales. Dossier technique Poitou-Charentes. Janvier 2010.

Vertès, F.; Jeuffroy, MH.; Louarn, G.; Voisin, AS.; Justes, E. - 2015. Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations. Actes des journées de l'AFPF, La fertilité des sols dans les systèmes fourragers, 8-9avril 2015.

Weber, J-P.; Aubert, C.; Glachant, C. - 2015. Luzerne : la fertilisation de demain. Synthèse pluriannuelle des essais 2010 à 2013. Non publié.

Wiens, M. J.; Entz, M. H.; Martin, R. C.; Hammermeister, A. M. - 2006. Agronomic benefits of alfalfa mulch applied to organically managed spring wheat. Can. J. Plant Sci., 86, 121-131.