

## EFELE – Ille et Vilaine, mis en place en 2012

L'UMR INRA Agrocampus SAS est porteur depuis 2012 de la plateforme expérimentale **EFELE** intégrée dans le **Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduaire Organiques (SOERE PRO)**.

**EFELE** résulte d'une volonté i) **de compléter le dispositif national du SOERE PRO** par la mise en place d'un site dédié à l'étude des effets des produits organiques issus des élevages, ii) **d'anticiper** sur l'émergence de nouvelles questions, sur l'apparition de nouveaux produits et sur l'évolution probable des systèmes de culture. Ce projet est donc unique et innovant, du fait notamment de l'intégration dans le plan expérimental de co-produits issus du traitement des effluents (méthanisation et compostage), la prise en compte de nouvelles pratiques agricoles (mode de travail du sol) et des objectifs de réduction de l'utilisation des pesticides définis par le Grenelle de l'Environnement.

Concrètement, **EFELE porte sur la mise en œuvre de 2 essais**, sur lesquels i) **les effets de 5 produits organiques** sont comparés à des traitements témoin et ii) l'interaction entre le **mode de travail du sol** et l'apport d'effluent sur la dynamique de la MO et des micropolluants seront étudiés. L'instrumentation du site est conçue pour mesurer les transferts d'eau, d'éléments chimiques et de micropolluants (lysimètres à mèche, TDR, tensiomètres...), et les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O).

Le suivi expérimental d'EFELE a débuté au printemps 2012, pour une durée de 20 ans.

### 1. Plan expérimental – facteurs étudiés

EFELE est constituée de 2 essais implantés sur une parcelle du domaine de l'EPLEFPA du Rheu :

- **un essai nommé « PROs »**, dispositif en **4 blocs complets**, sur lequel on étudie les effets des apports des produits représentatifs de la diversité des effluents issus des élevages. Cinq produits ont été choisis en croisant des critères typologiques différents, tels que l'espèce animale, les procédés de traitement, et la réactivité des effluents vis-à-vis de leur transformation dans le sol. Ces produits sont : un fumier de bovins, un lisier de porc, du fumier de volaille, un fumier de porc composté sur paille, et un digestat de méthanisation obtenu après digestion anaérobie d'effluents d'élevage,
- **un essai nommé « TS/MO »**, dispositif en **bandes avec 3 répétitions** sur chaque traitement, permettant d'étudier l'interaction entre le mode de travail du sol et l'apport d'effluent sur la dynamique de la MO et des micropolluants. Deux modes de travail du sol (labour et travail du sol simplifié) sont croisés à 2 modes de fertilisation (minérale et organique, sous forme de fumier de bovins).



**Figure 1.** Implantation des 2 essais d'EFELE sur la parcelle du domaine de l'EPLEFPA du Rheu

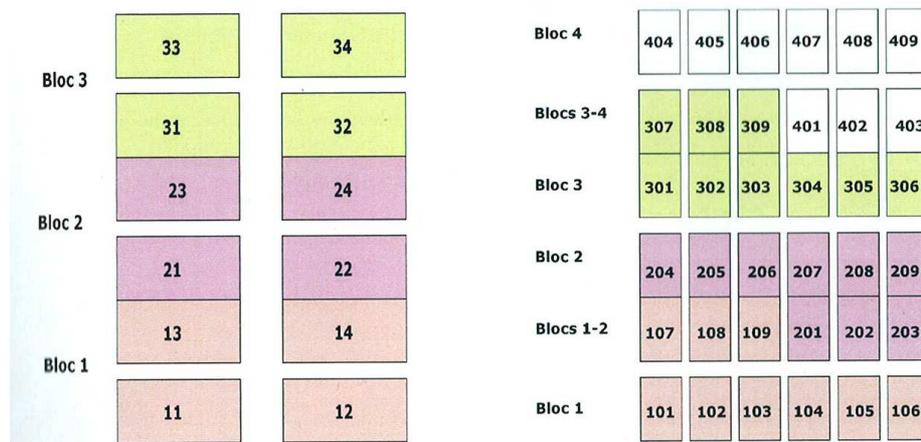


Figure 3. Implantation des 2 essais d'EFELE sur la parcelle du domaine de l'EPLEFPA du Rheu

**Tableau 1.** Traitements expérimentaux appliqués sur EFELE (ON : témoin sans fertilisation minérale ; MIN : témoin avec fertilisation minérale ; LP : lisier de porc ; DIG-LP : digestat de méthanisation de lisier de porc ; CP: fumier de porc composté ; CP+N : fumier de porc composté avec complémentation minérale N ; FB : fumier de bovins ; FB + N : fumier de bovins avec complémentation minérale N ; FV : fumier de volailles. TS : travail du sol simplifié ; LAB : labour)

**Essai PROs**

	Bloc 1		Bloc 2		Bloc 3		Bloc 4	
101	CP + N	201	CP + N	301	ON	401	CP	
102	LP	202	LP	302	CP	402	FB	
103	MIN	203	ON	303	FB	403	CP + N	
104	FB + N	204	FB + N	304	DIG-LP	404	LP	
105	FV	205	CP	305	FV	405	FB + N	
106	DIG-LP	206	FV	306	CP + N	406	ON	
107	CP	207	FB	307	MIN	407	DIG-LP	
108	ON	208	DIG-LP	308	LP	408	FV	
109	FB	209	MIN	309	FB + N	409	MIN	

**Essai TS/MO**

	Bloc 1		Bloc 2		Bloc 3	
11	LAB-MIN	21	LAB-FB	31	LAB-MIN	
12	TS-FB	22	TS-MIN	32	TS-MIN	
13	LAB-FB	23	LAB-MIN	33	LAB-FB	
14	TS-MIN	24	TS-FB	34	TS-FB	

## 2. Pédologie

Le sol d'EFELE est un LUVISOL-REDOXISOL issu de limons éoliens sur terrasse alluviale reposant sur schiste tendre selon le Référentiel Pédologique de 2008 (Baize et Girard, 2009).

Le sol est sec de manière saisonnière et jamais submergé. Le drainage naturel est imparfait et on note un excès d'eau qui se matérialise par la présence d'une nappe perchée temporaire dans le profil.

Le positionnement des 3 fractions granulométriques (argile, limons et sables) dans le triangle des textures GEPPA est en accord avec les textures de terrain relevées par les pédologues. Jusqu'à 70 cm la texture des horizons est dominée par les fractions limoneuses (particulièrement les limons grossiers caractéristiques des limons éoliens) et est de type limoneuse (L) (Tableau 2).

La teneur en matière organique de surface est moyenne (2.06% entre 0 et 30 cm) et diminue légèrement jusqu'à 42 cm (1.52%). Le rapport C/N de surface est de 10, signe d'une bonne minéralisation de la matière organique.

**Tableau 2. Granulométrie 5 fractions et teneurs en matière organique**

	Limites (cm)	Argile (%) <sup>1</sup>	Limon fin (%) <sup>1</sup>	Limon grossier (%) <sup>1</sup>	Sable fin (%) <sup>1</sup>	Sable grossier (%) <sup>1</sup>	CO (g/kg) <sup>2</sup>	MO (g/kg) <sup>3</sup>	N tot (g/kg) <sup>4</sup>	Rapport C/N
LA	0-30	14.6	24	45.3	10	6.1	11.9	20.6	1.19	10
A(g)	30-42	14.7	24.9	44.2	9.4	6.8	8.77	15.2	0.924	9.5
E(g)	42-70	16.1	25.2	44	8.5	6.2	3.65	6.31	0.438	8.32
E/BTg	70-85	21.6	24.4	43.6	6.7	3.7	1.92	3.32	0.311	6.18
BTg1	77-123	24.4	23.3	43.3	5.8	3.2	1.54	2.67	0.292	5.3
BTg2	110-153	19.1	29.2	26.4	13.9	11.4	0.829	1.43	0.265	3.13
IISg	153-180	14.2	19.9	16.4	20.4	29.1	0.549	0.95	0.214	2.57

<sup>1</sup>Granulométrie 5 fractions sans décarbonatation (NF X 31-107)

<sup>2</sup>Analyse élémentaire par combustion sèche - ISO 10694:1995 (ISO 10694:1995)

<sup>3</sup>Calculée CO x 1.724

<sup>4</sup>Analyse élémentaire par combustion sèche ISO 13878:1998 (ISO 13878:1998)

Le pH<sub>eau</sub> de surface est peu acide (compris entre 5 et 6.5) (Tableau 3), son évolution en profondeur est plus surprenante. Il augmente jusqu'à atteindre la neutralité (pH de 7.2 à 110 cm de profondeur) puis diminue dans l'horizon structural (IIS) qui est caractéristique du second matériau parental (terrasse sableuse).

La CEC Metson de surface est faible (6.34 cmol+/kg) due à un taux d'argile faible (14.6%) et une teneur en matière organique moyenne (2.06%). Elle n'excède pas 8 cmol+/kg dans l'horizon le plus argileux (BTg1).

En considérant la CEC effective au pH du sol (CEC cobaltihexammine) et les cations échangeables alcalins et alcalino-terreux, on constate que la CEC est saturée (S/CEC supérieure à 95%) dans tous les horizons et saturée à plus de 75% par le calcium échangeable.

**Tableau 3. Analyses chimiques du pH, du phosphore et de la garniture cationique**

	Limite (cm)	pH eau <sup>1</sup>	pH KCl <sup>2</sup>	P2O5 ass <sup>3</sup> (g/kg)	CEC Metson <sup>4</sup>	CEC cob <sup>5</sup>	Ca éch <sup>5</sup>	Mg éch <sup>5</sup>	Na éch <sup>5</sup>	K éch <sup>5</sup>	S/CEC cob (%)
					(cmol+/kg)						
LA	0-30	6.1	5.1	0.152	6.34	5.8	4.57	0.673	0.0498	0.319	97
A(g)	30-42	5.9	4.8	0.138	5.92	4.62	3.86	0.562	0.0468	0.301	103
E(g)	42-70	6.5	5	0.057	4.83	4.31	3.53	0.528	0.0396	0.216	100
E/BTg	70-85	7	5.31	0.03	6.56	6.98	5.76	0.861	0.0809	0.158	98
BTg1	77-123	7.05	5.3	0.025	7.8	8.49	7.02	1.15	0.127	0.166	100
BTg2	110-153	7.2	5.4	0.012	5.24	6.34	4.71	1.3	0.107	0.114	98
IISg	153-180	6.9	5.2	0.011	3.68	3.47	2.65	0.886	0.068	0.075	106

<sup>1</sup>Détermination du pH eau (dilution 1/5) ISO 10390:1994 (ISO 10390:1994)

<sup>2</sup>Détermination du pH KCl (dilution 1/5) ISO 10390:1994 (ISO 10390:1994)

<sup>3</sup>Méthode Olsen - ISO 11263:1994 (ISO 11263:1994)

<sup>4</sup>Déplacement par l'acétate d'ammonium (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>) tamponné à pH 7 (méthode Metson)

<sup>5</sup>Solution de trichlorure de cobaltihexammine (ISO 23470:2007) (ISO 23470:2007)

### 3. Conduite du site

#### 3.1. Succession culturale étudiée

La succession culturale étudiée est une **succession maïs/blé-CIPAN<sup>1</sup>**, et le mode de conduite des cultures vise à obtenir la meilleure performance environnementale :

- Conduite des céréales selon l'itinéraire technique et culturale (ITK) à 'bas niveaux d'intrants', qui repose sur le choix de variétés résistantes aux maladies, d'un semis à plus faible densité qu'en conventionnel, d'une minoration de la fertilisation de 40 unités, et d'une seule application de fongicide ;
- Destruction mécanique des CIPAN ;
- Modalités d'apport des effluents visant à minimiser les pertes en azote et autres éléments minéraux (enfouissement immédiatement après l'apport des PROs, l'année en maïs).

<sup>1</sup> CIPAN : culture intermédiaire piège à nitrate

La parcelle a porté 2 cultures de maïs d'homogénéisation en 2010 et 2011. Une culture de maïs a été mise en place en 2012 pour la 1<sup>ère</sup> année de l'expérimentation, suivie d'un blé en 2013, avec une interculture de moutarde après blé, d'un maïs en 2014 et 2016, et d'un blé/moutarde en 2015.

### 3.2. Raisonement de la fertilisation azotée (N)

La dose d'engrais minéral à apporter sur la culture (traitements MIN des 2 essais) a été calculée par la méthode du bilan prévisionnel.

Les apports ont été faits en une fois avant le semis du maïs, la dernière semaine d'avril, en 2012, 2014 et 2016. Les apports ont été fractionnés sur la culture de blé, avec 2 apports (mars et mai).

Les itinéraires culturaux adoptés conduisent à des niveaux de fertilisation azotés modérés, avec une fertilisation égale en moyenne à 92 kg N/ha sur maïs et à 118 kg N/ha sur blé, depuis le début de l'essai.

### 3.3. Raisonement des apports de PROs

Les apports de PROs sont annuels pour FV, LP et DIG-LP, et biannuels pour FB et CP. Les apports des 3 premiers PROs sont réalisés au début du printemps, sur blé en végétation, et avant le semis du maïs, pour les 5 PROs, correspondant à la pratique agronomique.

Les apports des 3 produits solides (FB, FV et CP) sont raisonnés sur la base du 1<sup>er</sup> élément limitant, le phosphore, avec pour objectifs de ne pas dépasser le seuil d'un apport annuel de 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / ha an (soit un apport maximal de 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / ha par apport de FB et CP). La fertilisation minérale azotée complémentaire des traitements CP+N, FB+ N et FV est calculée en prenant en compte la valeur fertilisante N à court terme de ces produits et la différence de reliquat avec le traitement en fertilisation minérale.

Les traitements FB des essais PROs et TS/MO, et le traitement CP de l'essai PROs ont reçu une fertilisation minérale N égale à celle du traitement MIN, sur blé, en 2013 et en 2015. Le niveau de fertilisation sera progressivement minoré au cours du temps, à partir de 2017, pour tenir compte de la minéralisation supplémentaire résultant de l'accroissement de la teneur en N organique du sol sur ces traitements.

Les apports des 2 produits liquides (LP et DIG-LP) sont raisonnés sur la base de leur valeur fertilisante azotée pour la culture, par l'utilisation d'un coefficient d'équivalence engrais. Le rapport entre la dose d'engrais et ce coefficient donne la dose d'azote  $X_{PRO}$  à apporter avec le produit, la dose de produit étant calculée par le rapport entre cette dose  $X_{PRO}$  et la teneur en N total de l'effluent.

Les apports sont réalisés à la main sur l'essai PROs, ce qui permet une parfaite maîtrise de la dose d'apport et une répartition homogène des produits sur les parcelles expérimentales (Figure 4). Le fumier de bovins est apporté avec un épandeur de largeur égale à 3 m sur l'essai TS/MO (Figure 4). La quantité de produit apportée sur chaque parcelle est mesurée par pesée de l'épandeur avant et après épandage.



**Figure 4.** Photos des apports de PRO réalisés à l'épandeur sur l'essai TS/MO (gauche) et à la main sur l'essai PRO

## 4. Mesures sur les PROs, les végétaux et les sols

### 4.1. Mesures sur les PROs

Les PROs font l'objet d'une caractérisation approfondie, par la mesure des teneurs :

- en matière sèche (MS), du pH et de la conductivité,

- en MO, par perte au feu à 550°C, en C organique, P Olsen, N ammoniacal et N total,
- en majeurs totaux (Al, Ca, Fe, K, Mg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na, Mn) et en traces totaux (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn)
- en éléments traces extraits à l'EDTA et au CaCl<sub>2</sub> (Cd, Cu, Pb, Zn)

Ces analyses sont réalisées à l'UMR SAS (teneurs MS, N ammoniacal et N total) et à l'INRA LAS.

La composition biochimique de la matière organique des PROs est caractérisée par la mesure des fractions solubles à l'eau à 20°C, du soluble Van Soest, des fractions hémicellulosiques (HEM), cellulosiques (CEL), cellulosiques de Wende, et lignines (LIC). Le carbone minéralisé à 3 jours est également mesuré pour le calcul de l'ISMO. L'indice de stabilité ISB a également été calculé jusqu'en 2015. Ces analyses sont réalisées par le LDAR de Laon.

La dynamique de minéralisation du carbone et de l'azote est enfin mesurée en conditions contrôlées de laboratoire, par une incubation des PROs sur le sol d'EFELE, d'une durée de 300 jours à 15°C.

## 4.2. Mesures sur les végétaux

**Mesures de la biomasse et du rendement :** Mesure du rendement grain de blé (qx à humidité 15%/ha) ; Mesure de la biomasse paille/enveloppes pour le blé ; Mesure du rendement du maïs, plante entière (maïs fourrage).

**Analyses :** Un composite des échantillons séchés à 40°C récoltés sur les 2 zones de récolte est réalisé pour l'analyse. Les teneurs en C et N sont déterminés sur les échantillons de toutes les parcelles. Les teneurs en éléments majeurs (P, K, Ca, Mg, Fe) et en traces (Mn, Zn, Bo, Cu) sont analysées sur le traitement de référence MIN des 2 essais. Les analyses sont réalisées par le laboratoire USRAVE de l'INRA.

## 4.3. Mesures réalisées sur le sol entre 2012 et 2016

### Caractérisation initiale du sol des 2 essais (mars 2012)

La caractérisation initiale de la parcelle a été réalisée en mars 2012, avant les premiers apports de PROs. Elle a eu pour objectifs i) de réaliser des mesures physiques, chimiques, biologiques, microbiologiques, géophysiques et spectrales dans le visible et proche infra-rouge, et ii) de prélever des échantillons de sol pour l'archivage de longue durée (terrothèque de sols séchés à l'air conservés à température ambiante, et d'échantillons conservés à - 40°C pour les analyses de microbiologie moléculaire).

Les mesures ont été faites à l'échelle de la parcelle expérimentale de chacun des essais (soit 36 parcelles pour l'essai PROs et 12 parcelles pour l'essai TS/MO), à raison d'une mesure par parcelle ou sur un échantillon composite résultant du mélange de 6 sondages par parcelle. Les mesures géophysiques et spectrales ont été faites à 2 niveaux d'échelle, celui de la parcelle expérimentale et celui de la parcelle entière. Les prélèvements de sol ont été faits sur une profondeur de 1m, et divisés en horizons de 5 à 20 cm de hauteur, définis à partir de la description pédologique de la parcelle (Tableau 4). L'horizon de surface correspond à l'horizon labouré pour l'essai PROs, et discrétisé en 2 horizons pour l'essai TS/MO.

**Tableau 4.** Horizons de sol prélevés sur les 2 essais

Essai TS/MO		Essai PROs	
H1	0-15	H1-2	0-25 cm
H2	15-25		
H3	25-30	H3	25-30
H4	30-40	H4	30-40
	Hz5		[40 ; 50]
	Hz6		[50 ; 65]
	Hz7		[65 ; 80]
	Hz8		[80 ; 100]

Le tableau 5 récapitule l'ensemble des mesures réalisées par les équipes impliquées.

**Tableau 5.** Présentation synthétique des mesures réalisées, du niveau d'échelle, des horizons concernés, et des équipes impliquées

	Zone élémentaire	Horizons	Echantillonnage
<b>Mesures physiques</b>			
<b>SAS Rennes</b>			
Structure :			
- Densité apparente	Parcelle exp.	H1, H2 et H4	Elémentaire (1 s)
- Porosimétrie	Parcelle exp.	H1, H2 et H4	Elémentaire
Infiltrométrie TRIMS	Parcelle exp.	H1, H2 et H4	Elémentaire
Propriétés de rétention	Parcelle exp.	H1-H4	Elémentaire
Stabilité structurale	Parcelle exp.	H1, H2 et H4	Elémentaire
<b>Microbiologie et biodiversité</b>			
<b>Genosol Dijon</b>			
	Parcelle exp.	H1-H2 et H1-2	Composite (6s)
<b>IRSTEA Rennes</b>			
Indicateurs E Coli Entérocoques	Parcelle exp.	H1 et H4	Composite (6s)
<b>ECOBIO</b>			
Biodiversité lombricienne	Parcelle exp.	H1-Hn	Elémentaire
<b>PESSAC</b>			
Macrofaune du sol	Parcelle exp.	H1	Elémentaire
Macrofaune de surface	Parcelle exp.	surface	Pot piège
<b>Mesures biologiques</b>			
<b>SAS Rennes</b>			
Biomasse microbienne	Parcelle exp.	H1 et H1-2	Composite (6s)
Minéralisation CN labo	Parcelle exp.	H1 et H1-2	Composite (6s)
<b>PESSAC</b>			
Marqueurs enzymatiques	Parcelle exp.	H1 et H1-2	Composite (5s)
<b>Mesures géophysiques et spectrales</b>			
<b>SAS Rennes</b>			
Mesures résistivité surface	Parcelle exp.	surface	Maille
Mesures spectrales (SPIR) 'labo'*	Parcelle exp.	H1-H2 et H1-2	Composite
Mesures spectrales (SPIR) 'champ'*		surface	Maille
<b>Mesures chimiques</b>			
<b>LAS Arras</b>			
Teneurs majeurs et traces	Parcelle exp.	H1 à Hn	Composite (6s)
Autres paramètres (pH, CEC...)	Parcelle exp.	H1-H2 et H1-2	Composite (6s)

### Reliquats d'azote minéral

Les profils d'azote minéral sont mesurés en sortie hiver et en début d'automne. Le reliquat sortie hiver (Re) est une composante du calcul de la fertilisation N, et le reliquat de début d'automne (Rf) donne une indication pertinente sur le risque de pertes par lixiviation au cours de l'hiver. Les 2 reliquats sont en outre indispensables au calcul du bilan azoté des cultures, *ie* au calcul de la minéralisation nette de l'azote organique du sol, donnée par le bilan sur le témoin 0N, et de la fourniture en N des PROs, calculée par différence entre le bilan azoté du témoin 0N et celui du traitement fertilisé par l'apport de PRO.

Un profil est constitué par les 3 horizons 0-30, 30-60 et 60-90 cm, et l'échantillonnage de sol résulte d'un composite de 4 sondages par parcelle expérimentale. Les mesures sont faites sur les blocs 2, 3 et 4 de l'essai PROs et sur les 3 blocs de l'essai TS/MO.

### Approche intégrée et dynamique de l'évolution des propriétés et du fonctionnement du sol

L'un des objectifs principaux d'EFELE est de caractériser **la trajectoire d'évolution des propriétés et du fonctionnement du sol** sous l'effet des facteurs étudiés : apports de PROs et mode de travail du sol, dans le contexte d'une succession de cultures annuelles, avec de bas niveaux d'intrants en engrais et en produits phytosanitaires. Cette approche dynamique repose sur le choix de fréquences de mesures à une échelle de temps variable, selon le temps de réponse de la grandeur mesurée aux facteurs étudiés : **annuelle**, voire infra-annuelle, **biannuelle**, ou **quadriennale**.

Les mesures portent sur les 3 composantes physiques, chimiques et biologiques impactées par les apports de PROs et le mode de travail du sol :

- **Mesures physiques (UMR SAS)** : évolution des caractéristiques **hydrodynamiques, de la porosité et de la stabilité structurale** des horizons de surface. Trois indicateurs sont retenus pour caractériser l'évolution interannuelle de la qualité physique du sol : la densité apparente, la stabilité structurale, et la conductivité hydraulique.

- **La macrofaune de surface et la macrofaune du sol (UMR EcoSys).** La macrofaune des sols correspond à la faune de plus de 2 mm de diamètre (Bardgett and Cook, 1998). Certains groupes (vers, termites, myriapodes, diptères ou coléoptères) exercent un rôle essentiel de par leurs abondances et leurs activités dans le sol (Lavelle and Spain, 2001). La distribution des macro-invertébrés du sol répond à plusieurs facteurs : (1) biotiques, comme le comportement social, la capacité de dispersion, la compétition inter- et intra-spécifique, les relations proies-prédateurs ou encore la ressource trophique ; (2) abiotiques, comme le pH du sol, son humidité, sa texture ou l'épaisseur et l'hétérogénéité verticale des horizons. Plusieurs groupes ont été déterminés à l'espèce, Oligochaeta, Isopoda et Carabidae, Araneae), à l'aide de clefs d'identification spécifiques. Ces suivis ont été réalisés à une **fréquence biannuelle**, en mars 2012, mars 2014 et mars 2016.
- **La macrofaune lombricienne (UMR SAS et ECOBIO Paimpont).** Les caractérisations portent sur l'abondance, la biomasse, la structure fonctionnelle (épigés, anéciques, endogés) et l'âge ratio des individus. Ces mesures sont réalisées tous les 4 ans (2012, 2016, 2020...)
- **L'évolution des propriétés chimiques des sols et des stocks en éléments (UMR SAS),** mesurée sur les 3 horizons du profil 0-40 cm défini lors de la caractérisation initiale de la parcelle en 2012. Les teneurs en éléments du sol sur ces 3 horizons sont mesurées à une fréquence quadriennale (2012, 2016, 2020...), par la réalisation d'un échantillonnage composite. La densité apparente des horizons est également mesurée sur chaque parcelle, pour le calcul de l'évolution des stocks de MO et d'éléments.
- **L'analyse des stanols fécaux comme marqueurs de l'impact des PRO sur la MOS du sol (CNRS UMR Géosciences Rennes).** Les stanols sont des lipides issus de la dégradation des stérols par biohydrogénation dans le système digestif. Les distributions des stanols fécaux sont spécifiques d'une espèce animale à une autre en fonction de trois paramètres (régime alimentaire, synthèse endogène de stérols et présence de bactéries anaérobies spécifiques). La combinaison de ces trois paramètres résulte en une distribution de stanols fécaux caractéristique des déjections animales, appelée 'empreinte stanol' (Leeming et al., 1996). Ces distributions ont été utilisées dans les sols de parcelles expérimentales pour suivre le devenir des déjections animales dans le temps (Jardé et al., 2009).
- **Suivi de marqueurs enzymatiques (INRA UMR EcoSys).** Les microorganismes du sol qui transforment les MO sécrètent des enzymes extra- ou intracellulaires, dont la production et l'activité sont modifiées par les apports de produits organiques, de micropolluants (pesticides, éléments traces métalliques) et par les pratiques culturales. Les activités enzymatiques constituent donc des indicateurs du fonctionnement du sol et de sa biodiversité. Les activités Phosphatase (PHOS), Arylsulfatase (AryS),  $\beta$ -Glucosidase ( $\beta$ GLU) et Uréase (URE) sont mesurées **chaque année depuis 2012**, avant les apports de PROs. Les activités Phosphatase (PHOS), Arylsulfatase (ARS),  $\beta$ -Glucosidase ( $\beta$ GLU), Uréase (URE) et Arylamidase (ARYLN) ont été mesurées chaque année depuis 2012.
- **Suivi de l'indicateur de contamination fécale *E. Coli* (IRSTEA Rennes).** L'objectif de l'étude est d'évaluer l'impact de l'épandage des PROs sur le devenir de bactéries indicatrices de contamination fécale dans le sol. Les matrices analysées sont les sols et les PRO.
- **Approche moléculaire par extraction ADN des bactéries et champignons (INRA UMR Agroécologie – Genosol).** Cette approche a été mise en œuvre sur les échantillons de sol de l'horizon de surface prélevés lors de la caractérisation initiale de la parcelle en 2012. Les caractérisations suivantes ont été faites : (1) La mesure de la Biomasse Microbienne Moléculaire (rendement d'extraction d'ADN du sol qui est le meilleur estimateur de l'abondance microbienne), (2) Les densités de Bactéries et de Champignons (PCR quantitative, ADNr-16S et 18S respectivement), (3) Les structures Génétiques des Communautés de Bactéries et de Champignons (technique ARISA - technique d'empreintes moléculaires - qui donnent un code-barre caractéristique de la composition microbienne du sol).
- **L'étude des réponses des communautés bactériennes et virales des sols aux apports pérennes de PROs (CNRS UMR ECOBIO Rennes).** Dans les sols, les interactions entre virus et bactéries jouent un rôle primordial dans le cycle des nutriments et la boucle microbienne. Le ratio virus sur bactérie (VBR) est un indicateur des relations existant entre les virus libres et leurs bactéries potentiellement hôtes au sein d'un écosystème. Chaque année, à partir des échantillons de sol du monitoring et des échantillons de PROs épandus, les bactéries et virus seront extraits et analysés par cytométrie en flux après marquage au SYBR Green.
- **L'étude de l'impact de différents modes de fertilisation des terres sur les émissions de composés organiques volatiles (COVs) entre le sol et l'atmosphère (CNRS UMR ECOBIO Rennes).** Alors que les

apports de PROs sur les parcelles agricoles permettent le recyclage de déchets organiques générés par les activités humaines et sont proposés comme alternative aux engrais minéraux, il est important de déterminer les impacts environnementaux de ces pratiques culturales et notamment leur effet sur le stockage du C dans le sol et les émissions (directes ou indirectes) de gaz à effet de serre (GES). Ainsi, lors de la dégradation de la matière organique du sol (MOS), en plus du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et du méthane (CH<sub>4</sub>), il a récemment été montré que les microorganismes émettent des COVs qui constituent une perte supplémentaire de C du sol vers l'atmosphère et limitent d'autant la fonction de stockage de C du sol. Il existe donc un intérêt nouveau et majeur à étudier les émissions de COVs associées à la décomposition microbienne des PROs et à estimer leur contribution dans le cycle global du C. Les COVs sont échantillonnés sur le terrain au sein de canisters et les mélanges gazeux prélevés sont analysés au laboratoire à l'aide d'un PTR-MS (Proton Transfer Reaction – Mass spectrometer) et d'un  $\mu$ GC-MS (Gas Chromatography – Mass Spectrometer). Ces prélèvements et analyses de COVs sont réalisés au moins cinq fois par an afin d'acquérir des mesures saisonnières ainsi que des suivis en lien avec le monitoring annuel du site.

#### 4.4. Suivi de la matrice 'Eau'

##### 4.4.1. Suivi hydrodynamique

7 parcelles expérimentales (102, 103, 104 et parcelles 11 à 14) sont équipées chacune de cinq sondes TDR, (type : 6050X1, marque : Trase) de thermomètres (CTN) aux profondeurs de 13, 40, 60, 80 et 110 cm, et de quatre tensiomètres (type T4e) aux profondeurs de 40, 60, 80 et 110cm.

Entre la date du début de l'acquisition (13 septembre 2011) et le 20 octobre 2012, les mesures ont été faites à un pas de temps de 4h ; le pas de temps a été porté à 1 heure depuis le 21 octobre 2012.

Le transfert des données stockées par les centrales d'acquisition se fait chaque semaine sur le logiciel Hydras3, et sont sauvegardées sur serveur.

**Les mesures d'humidité par TDR :** Le TDR est un instrument qui permet de prendre les mesures en continu de l'humidité du sol pour suivre les variations de celle-ci au cours du temps. Le principe de la méthode TDR est basé sur la mesure du temps de parcours (t) et de l'atténuation de l'amplitude d'une impulsion électromagnétique lancée le long d'une ligne de transmission (TL) de longueur (L), enfoncée dans le sol.

**Les mesures tensiométriques :** Le tensiomètre utilisé est un tensiomètre électronique du type T4e d'UMS. C'est un tensiomètre robuste pour des applications *in situ* à moyen terme. Les tensiomètres sont installés à demeure dans le sol et sont posés sub-horizontalement avec un angle de 5° par rapport à l'horizontale (extrémité du capteur dirigée vers le haut). Les mesures tensiométriques permettent de décrire le sens de l'écoulement de l'eau dans le sol.

##### 4.4.2. Le dispositif lysimétrique

10 parcelles expérimentales sont instrumentées par des lysimètres à mèche : les parcelles 101 à 106 de l'essai PROs et les parcelles du bloc 1 de l'essai TS/MO (parcelles 11 à 14). Sept parcelles expérimentales (102, 103, 104 et parcelles 11 à 14) sont également équipées chacune de cinq sondes TDR, (type : 6050X1, marque : Trase) de thermomètres (CTN) aux profondeurs de 13, 40, 60, 80 et 110 cm, et de quatre tensiomètres (type T4e) aux profondeurs de 40, 60, 80 et 110cm.

Le pas de temps d'acquisition est horaire et le transfert des données stockées par les centrales d'acquisition se fait chaque semaine sur le logiciel Hydras3, avec une sauvegarde des données brutes sur serveur.

Les 10 parcelles instrumentées sont équipées chacune de deux paires de lysimètres à mèche installés aux profondeurs de 40 et 90 cm. Les plaques, de dimension égale à 0.5 m par 0.25 m (0.125 m<sup>2</sup>), sont reliées chacune à un flacon en verre de 10 l par un tuyau Tygon servant à collecter les eaux de drainage.

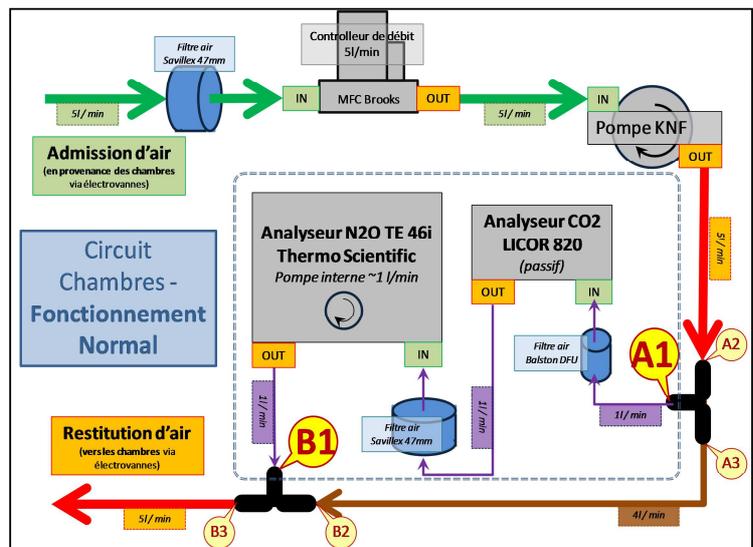
Les eaux de drainage sont collectées à la fin de chaque épisode drainant, dans un délai de 2 à 3 jours après l'arrêt du drainage.

#### 4.5. Monitoring des émissions de GES (CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O)

Le système de mesure des flux de GES installé sur EFELE comprend 6 chambres statiques (enceintes métalliques posées sur le sol, Figure 4) à ouverture/fermeture automatisée et cyclique ; un cycle de mesure dure 1h30, la mesure du flux sur chaque chambre durant 15 min.

La chambre se ferme automatiquement au début - et s'ouvre à la fin - de chaque période de 15 minutes, permettant l'accumulation dans l'enceinte fermée des GES émis par le sol et la végétation. Au cours de cette mesure, l'air est aspiré par pompage à 5l/min, au travers de tubes PVC de 6mm de diamètre, de la chambre vers une armoire climatisée d'analyse des GES par deux analyseurs de gaz dans l'infra-rouge (Thermo Scientific TE-46i pour N<sub>2</sub>O, LiCor-820 pour CO<sub>2</sub>) (Figure 4). L'ensemble du système d'ouverture/fermeture des chambres, des jeux d'électrovannes permettant l'échantillonnage séquentiel des différentes chambres, de même que l'acquisition des signaux des analyseurs, sont pilotés par une centrale Campbell Scientific CR3000.

Les GES sont mesurés en continu à une fréquence de 2 fois par minute (toutes les 30 secondes) afin de déterminer la pente de la cinétique des concentrations dans la chambre, cette pente étant directement proportionnelle au flux d'échange surface/atmosphère.



**Figure 4.** Vue d'ensemble des 6 chambres automatiques disposées sur deux placettes (3 chambres par parcelle expérimentale) et schéma du dispositif

A l'installation du dispositif, il a été décidé de faire 3 répétitions de mesures par traitement, les 6 chambres permettant donc de suivre les émissions sur 2 parcelles expérimentales.

L'acquisition a débuté en février 2013, quelques semaines avant les apports de fertilisants sur le blé cultivé en 2013, sur la parcelle fertilisée avec de l'engrais minéral, qui correspond à la situation de référence, et sur la parcelle fertilisée avec du lisier de porc.

Les suivis de GES sont réalisés en continu sur ces 2 parcelles expérimentales depuis 2013, afin i) de quantifier les facteurs d'émission sur la durée de la succession culturale blé/maïs, et ii) de caractériser la variabilité inter-annuelle des émissions, par la mesure des émissions sur plusieurs successions culturales blé/maïs.