



APESA



# Etude de caractérisation des fumiers de cheval issus de centres équestres afin d'aider à la décision sur les possibilités de valorisation

## Rapport final

RESPONSABLE : P.POUECH  
AUTEURS : C. GALIBARDY, C.LOUSTALE, E.ARRIBARROUY  
AOUT 2009  
RAPPORT FINAL  
REF. : FUMVAL\_2262

# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>METHODOLOGIE D'ECHANTILLONNAGE DES FUMIERS EQUINS AU NIVEAU DU TERRITOIRE NATIONAL</b>	<b>7</b>
2.1	OBJECTIFS	7
2.2	TYPLOGIE D'ECHANTILLONNAGE	7
2.3	REPARTITION GEOGRAPHIQUE	8
2.4	EFFECTIFS	10
2.5	MODE DE LOGEMENT	10
2.6	LITIERE UTILISEE	11
2.7	FREQUENCE DE CURAGE	12
2.8	MODE ET DUREE DE STOCKAGE	13
<b>3</b>	<b>BILAN GENERAL DES CAMPAGNES ANALYTIQUES SUR FUMIER DE CHEVAL</b>	<b>15</b>
3.1	ANALYSE DE LA COMPOSITION BIOCHIMIQUE DES FUMIERS	16
3.1.1	HUMIDITE ET MATIERE ORGANIQUE	16
3.1.2	MACROELEMENTS [NPK]	17
3.1.3	ELEMENTS TRACES METALLIQUES	21
3.1.4	CRITERES MICROBIOLOGIQUES	23
3.2	CARACTERISATION DE LA COMPOSTABILITE DES FUMIERS	23
3.2.1	PARAMETRES TECHNIQUES	23
3.2.2	PARAMETRES PHYSIQUES	24
3.2.3	PARAMETRES CINETIQUES	24
3.3	CARACTERISATION DE L'INTERET DES FUMIERS EN METHANISATION	25
3.3.1	NIVEAU DE BIODEGRADATION ANAEROBIE	26
3.3.2	INTERET EN METHANISATION	29
3.4	CARACTERISATION DE L'INTERET DES FUMIERS EN COMBUSTION	30
3.4.1	POUVOIR CALORIFIQUE	30
3.4.2	CENDRES ET MACHEFERS	32
3.4.3	EMISSIONS FUMEEES	35
<b>4</b>	<b>SYNTHESE ET PROPOSITION D'UNE AIDE A LA DECISION</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>40</b>
6.1	BILAN DES ANALYSES DE FUMIERS EQUINS	41
6.2	FICHE TECHNIQUE DU TEST DE COMPRESSIBILITE ET ESPACE LACUNAIRE	54
6.3	FICHE TECHNIQUE DU TEST DE RESPIROMETRIE	55
6.4	FICHE TECHNIQUE DU TEST DE POTENTIEL METHANOGENE	56
6.5	CINETIQUE DES TESTS DE POTENTIEL METHANOGENES	57
6.6	CARACTERISTIQUES BIOCOMBUSTIBLES	60

## Liste des abréviations

CH <sub>4</sub>	Méthane
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
ETM	Eléments traces métalliques
H	Humidité (%PB)
MM	Matière minérale
MO	Matière organique ; déterminée par calcination à 550°C
MS	Matière sèche ; déterminée par séchage à 105°C
MSV	Matière Sèche Volatile, assimilée à la MO
Nm <sup>3</sup>	Normo m <sup>3</sup> (volume aux conditions standards de pression et température)
PB	Produit Brut
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
TPM	Test de potentiel méthanogène

## Liste des illustrations

Figure 1 : Répartition géographique des réponses à l'enquête nationale.....	8
Figure 2 : Représentation de la répartition géographique des fumiers échantillonnés .....	8
Figure 3 : Comparaison des effectifs des centres enquêtés et des centres échantillonnés .....	10
Figure 4 : Comparaison des modes de logements des centres échantillonnés et des centres enquêtés. ....	11
Figure 5 : Comparaison des litières utilisées dans les centres échantillonnés et dans les centres enquêtés. ....	12
Figure 6 : Comparaison des centres échantillonnés et des centres enquêtés selon la fréquence de curage.....	12
Figure 7 : Comparaison des modes de stockage du fumier entre les centres échantillonnés et les centres enquêtés.....	13
Figure 8 : Comparaison des durées de stockage du fumier entre les centres échantillonnés et les centres enquêtés.....	14
Figure 9 : Teneur des fumiers en Humidité, matière minérale et matière organique.....	16
Figure 10 : Teneur des fumiers en humidité, MS, MO en fonction du type de litière .....	17
Figure 11 : Teneur des fumiers en éléments NPK en g/kg de MS.....	18
Figure 12 : Teneur des fumiers en éléments NPK en kg/m <sup>3</sup> .....	18
Figure 13 : Comparaison des valeurs fertilisantes des fumiers selon le type de litière : paille ou copeaux .....	19
Figure 14 : Comparaison des valeurs fertilisantes des fumiers selon le type de litière : humide ou sèche .....	19
Figure 15 : Composition des fumiers en formes azotées. ....	20
Figure 16 : Comparaison de la valeur fertilisante des fumiers avec d'autres types de matière organique .....	20
Figure 17 : Teneur des fumiers en éléments traces métalliques. ....	22
Figure 18 : Comparaison des teneurs en éléments traces métalliques des fumiers avec la norme NFU 44051 .....	22
Figure 19 : cinétiques de consommation d'O <sub>2</sub> lors du compostage.....	25
Figure 20 : Banc d'essai de détermination de potentiel méthanogène .....	26
Figure 21 : Potentiels méthanogènes et teneur en CH <sub>4</sub> des fumiers.....	27
Figure 22 : Intérêt de la méthanisation en fonction du type de litière .....	28
Figure 23 : Potentiel méthanogène en fonction de la durée de stockage des fumiers.....	29
Figure 24 : Positionnement des PM des fumiers équins parmi d'autres types de MO .....	30
Figure 25 : PCI des fumiers .....	31
Figure 26 : Comparaison des PCI des fumiers selon le type de litière : paille ou copeaux.....	32
Figure 27 : Comparaison des PCI des fumiers selon le type de litière : sèche ou humide .....	32
Figure 28 : Production de cendres et de mâchefers .....	34
Figure 29 : Taux de cendres, de silice et température de fusibilité selon le type de litière : paille ou copeaux .....	34

Figure 30 : Taux de cendres, de silice et température de fusibilité selon le type de litière : sèche ou humide .....	35
Figure 31 : Emissions lors de la combustion .....	36
Figure 32 : Diagramme d'aide au choix des filières de valorisation des fumiers équins .....	38

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des échantillons en fonction du type de litière et de la campagne d'échantillonnage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 2 : Typologie d'échantillonnage .....	7
Tableau 3 : Présentation des échantillons en fonction du type de litière et de la campagne d'échantillonnage .....	15
Tableau 4 : Composition des fumiers en humidité, MS, MO .....	16
Tableau 5 : Composition des fumiers en macroéléments NPK .....	17
Tableau 6 : Composition des fumiers en éléments traces métalliques .....	21
Tableau 7 : Eléments pathogènes des fumiers .....	23
Tableau 8 : Paramètres techniques de la compostabilité des fumiers .....	24
Tableau 9 : Paramètres physiques de la compostabilité des fumiers .....	24
Tableau 10 : Niveau de biodégradation anaérobie des fumiers .....	26
Tableau 11 : Résultats des TPM des fumiers sur litière copeaux .....	27
Tableau 12 : Résultats des TPM des fumiers sur litière paille .....	28
Tableau 13 : Pouvoir calorifique des fumiers .....	31
Tableau 14 : Production de cendres et de mâchefers .....	33
Tableau 15 : Emissions lors de la combustion .....	36

# 1 Introduction

L'objectif de cette étude est de caractériser les fumiers équins produits dans différents types d'exploitations afin de mettre en place une typologie des exploitations permettant d'identifier des « produits fumiers » aux caractéristiques différentes. Ce travail doit contribuer à la mise en place d'une démarche d'aide à la décision pour les centres équestres quant aux choix possibles concernant les filières de valorisation de leurs fumiers. Pour cela, une campagne d'analyses sur des échantillons de fumiers équins représentatifs des sites français a été réalisée.

Précisons que cette caractérisation doit apporter des éléments de connaissance sur les fumiers équins afin de valider la faisabilité de différentes filières de valorisation : épandage agricole, compostage, méthanisation et combustion.

L'étude s'est déroulée en trois étapes :

- Réalisation d'une enquête nationale aboutissant à la création d'une base de données.
- Première campagne d'échantillonnages et d'analyses permettant de définir des premières tendances et ainsi affiner les critères de choix des centres équestres à échantillonner lors de la deuxième campagne analytique.
- Deuxième campagne d'échantillonnages et d'analyses permettant de caractériser au mieux les typologies de fumiers équins.

La première campagne d'échantillonnage a concerné 6 échantillons de fumier équin. Puis, les premiers résultats ont permis d'affiner les critères pour la sélection de 14 autres centres équestres pour l'échantillonnage de fumiers.

De manière à identifier les filières de valorisation les plus adaptées (épandage, compostage, méthanisation ou combustion), les échantillons ont été caractérisés selon différents critères :

- une caractérisation agronomique et une analyse de l'innocuité de ces fumiers (analyse des éléments traces métalliques et des organismes pathogènes) afin de vérifier la possibilité de l'épandage en se basant sur les critères de la norme NFU 44-051 relative aux amendements organiques.
- des tests de compostabilité : détermination de l'espace lacunaire et test de respirométrie.
- un test de potentiel méthanogène pour déterminer la biodégradabilité anaérobie de ces fumiers et la production de biogaz inhérente.
- Une analyse des caractéristiques de combustion : pouvoir calorifique, taux de cendres, taux de silice, taux de soufre...

Ce rapport expose les résultats issus des deux campagnes analytiques. Les sites échantillonnés sont également comparés aux sites enquêtés lors de l'enquête nationale selon différentes caractéristiques afin de s'assurer de la représentativité de l'échantillonnage.

## 2 Méthodologie d'échantillonnage des fumiers équins au niveau du territoire national

### 2.1 Objectifs

La méthodologie d'échantillonnage s'appuie sur les informations collectées au moyen d'une enquête de terrain et d'un questionnaire. En effet afin d'établir une campagne représentative des centres équestres au niveau national et de leurs différentes modalités de gestion des fumiers, une enquête préalable sur les pratiques des éleveurs étaient indispensables. Ce travail a été confié à des élèves ingénieurs de l'Ecole Centrale de Paris sous la supervision de la FIVAL et avec l'accompagnement scientifique de l'APESA.

Les données de cette enquête sont disponibles dans le document d'analyse des données réalisé par les étudiants de l'école centrale de Paris.

### 2.2 Typologie d'échantillonnage

Le manque de données au niveau national sur la composition des fumiers équins et sur les pratiques de gestion des litières des centres équestres, nous a amené à mettre en œuvre une campagne d'échantillonnage en 2 temps :

- Une première campagne : basée sur 6 échantillons il s'agissait principalement de récupérer des fumiers pouvant répondre à 3 critères de composition : type de litière, taux d'humidité, taux de souillure.
- Une deuxième campagne d'échantillonnage : basée sur l'analyse des résultats de l'enquête nationale effectuée auprès des centres équestres mais aussi basée sur les résultats de la première campagne d'échantillonnage.

Les fumiers sont répartis en deux catégories : les fumiers à base de litière de paille et les fumiers à base de litière de copeaux de bois. Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques des fumiers échantillonnés. Il ressort de l'étude nationale que les caractéristiques correspondant aux cellules sur fond jaune du tableau sont en fait les plus courantes. Au total 18 échantillons ont été réalisés au niveau national.

Tableau 1: Typologie d'échantillonnage

Litière	Humidité	Matière organique	Sites 1 <sup>ère</sup> campagne	Sites 2 <sup>ème</sup> campagne	Nbre d'échant.
Paille	+++	+++	Site 6	P 3-2	2
		+	Site 2	P 2-3	2
	+	+++	Site 5	P 1-3 ; P 2-1 ; P 3-1	4
		+	Site 3	P 1-1 ; P 2-2 ; P 2-4 ; P 2-5	5
Copeaux	+	+++	Site 1	C2	2
	+++	+	Site 4	C3 ; C4	3

## 2.3 Répartition géographique

L'enquête nationale a recueilli les réponses de sites répartis sur la totalité des régions françaises. Les centres équestres échantillonnés lors de la première campagne analytique sont eux très localisés autour de la région parisienne, sauf le site de Biarritz en Aquitaine. Il apparaît clairement que la répartition géographique des fumiers échantillonnés ne couvre pas la totalité du territoire alors que l'enquête nationale propose une répartition assez homogène. Le choix des sites à échantillonner pour la seconde campagne analytique s'est fait de manière à obtenir une répartition homogène des sites sur la totalité du territoire français.

Figure 1 : Répartition géographique des réponses à l'enquête nationale

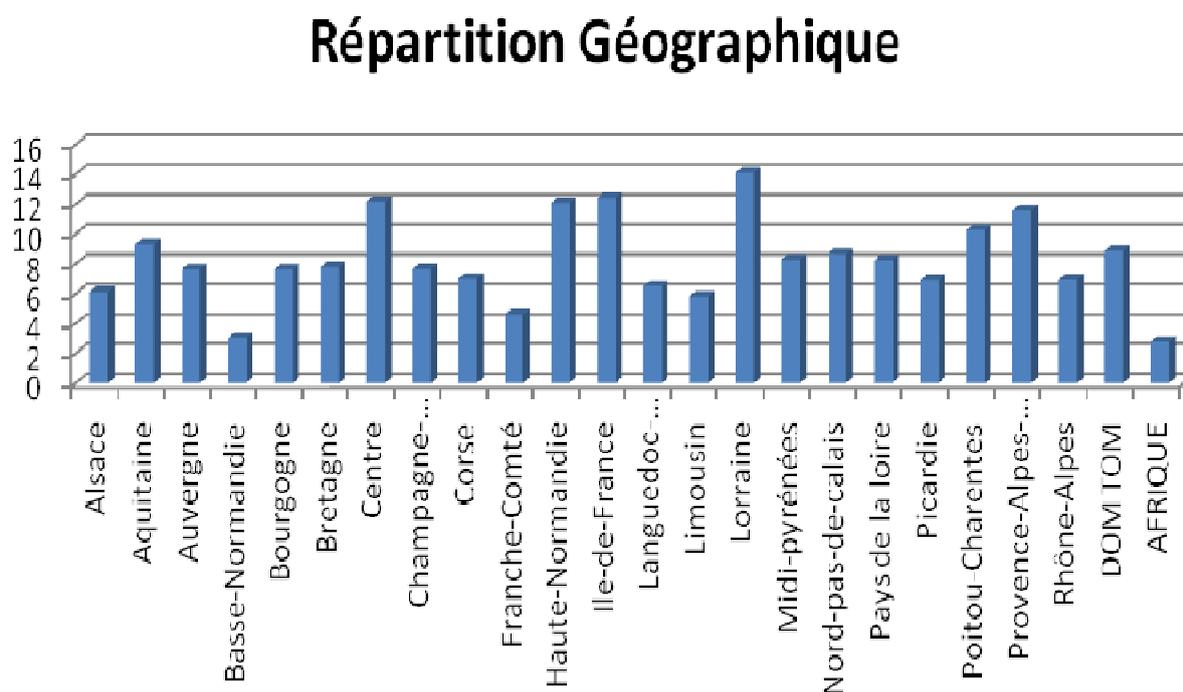
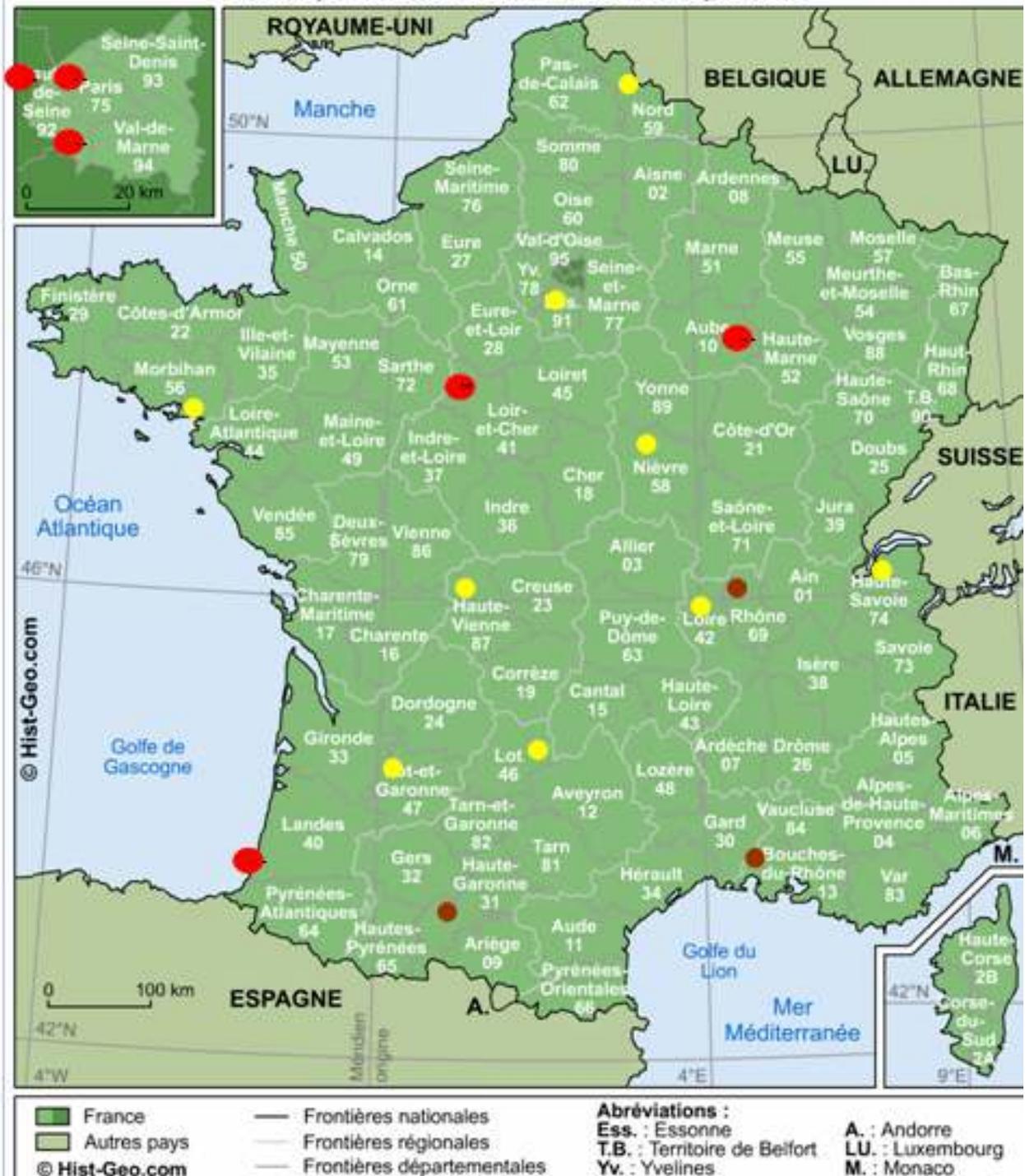


Figure 2 : Représentation de la répartition géographique des fumiers échantillonnés

## Les départements de la France métropolitaine



- : Sites d'échantillonnage fumier 1<sup>ière</sup> campagne
- : Sites échantillonnage fumier/copeaux 2<sup>ième</sup> campagne
- : Sites échantillonnage fumier/paille 2<sup>ième</sup> campagne

## 2.4 Effectifs

Lors de l'analyse de la première campagne, il est apparu que les 6 centres échantillonnés dans la première étape ont des effectifs qui ne correspondent pas à la majorité des centres nationaux. En effet, sur les 6 fumiers échantillonnés :

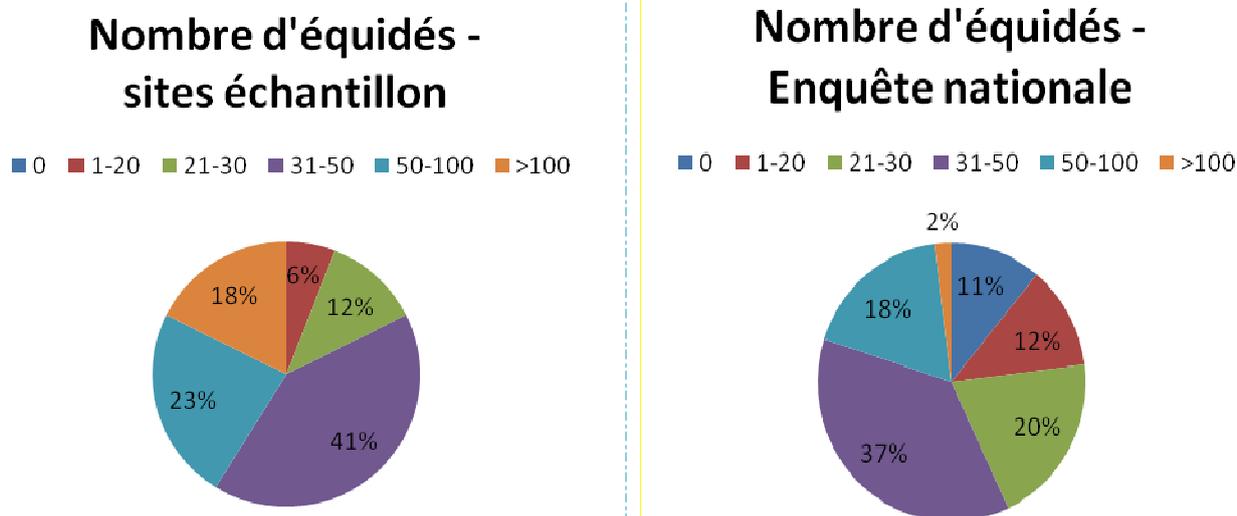
- 3 sites ont un effectif de plus de 100 équidés, ce qui correspond à 2% des centres enquêtés
- 1 site a un effectif compris entre 50 et 100, ce qui correspond à 18% des centres enquêtés
- et 1 site a un effectif compris entre 1 et 20, ce qui correspond à 12% des centres enquêtés.

Cet échantillonnage de 6 fumiers caractérise donc 32% des centres nationaux, avec 3 des échantillons correspondant à seulement 2% du panel national.

Les 12 sites échantillonnés lors de la seconde campagne analytique permettent d'obtenir un panel se rapprochant d'avantage de ce qui est constaté, en terme d'effectif d'équidés, dans les centres français.

Les catégories les plus représentées lors de l'enquête nationale, c'est-à-dire entre 21 et 100 équidés (soit 75% des centres) sont représentées dans les mêmes proportions dans notre étude : 76% des sites échantillonnés. La catégorie des sites ayant plus de 100 équidés est largement sur représentées par les sites échantillonnés puisque 3 sites entrent dans cette catégorie. Enfin la catégorie 1 à 20 équidés est assez bien représentée puisque 6% des centres échantillonnés représentent 12% des centres enquêtés.

Figure 3 : Comparaison des effectifs des centres enquêtés et des centres échantillonnés



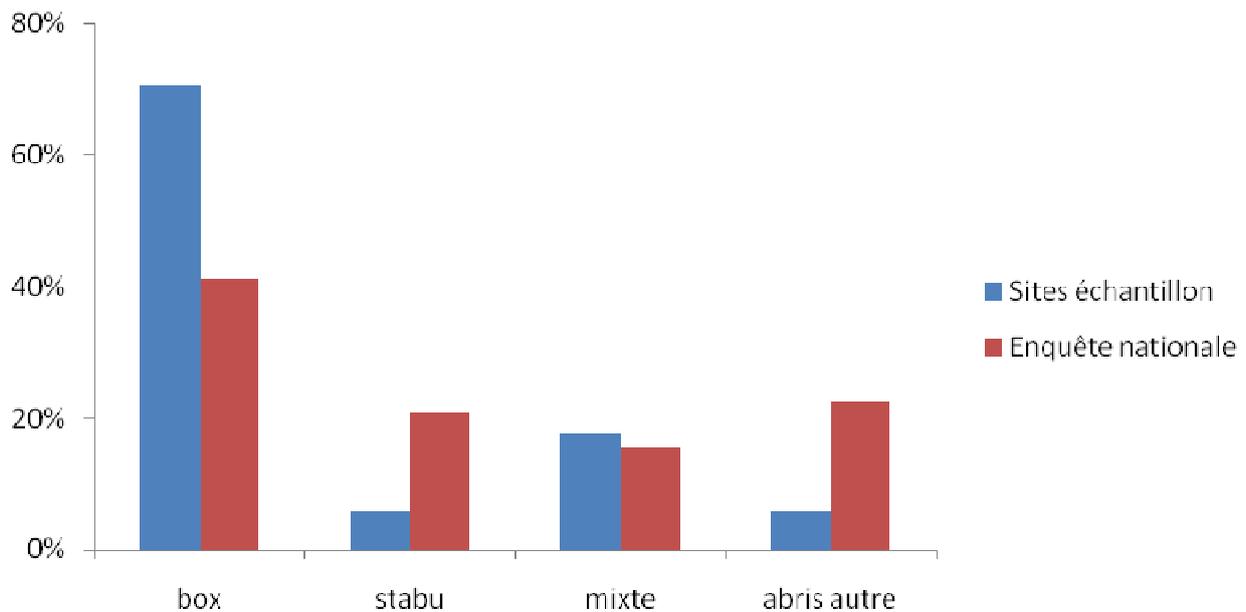
## 2.5 Mode de logement

De la même façon, les 6 sites de la première campagne ne couvraient pas la totalité des habitudes recensées en France. 5 des centres échantillonnés concernaient le mode de logement le plus courant en France, soit environ 40% de logement en box. Un échantillon seulement représentait le logement mixte qui concerne tout de même 20%

des centres enquêtés et les 20% des centres utilisant des stabulations n'avaient pas d'échantillon représentatif de leur mode de logement.

La suite de la campagne a donc permis d'élargir le panel, ainsi les sites échantillonnés représentent toutes les catégories : logement en box, en stabu, mixte, en abris ou autre. Le mode de logement le plus courant est le box, c'est également le plus couramment utilisé sur les sites échantillonnés.

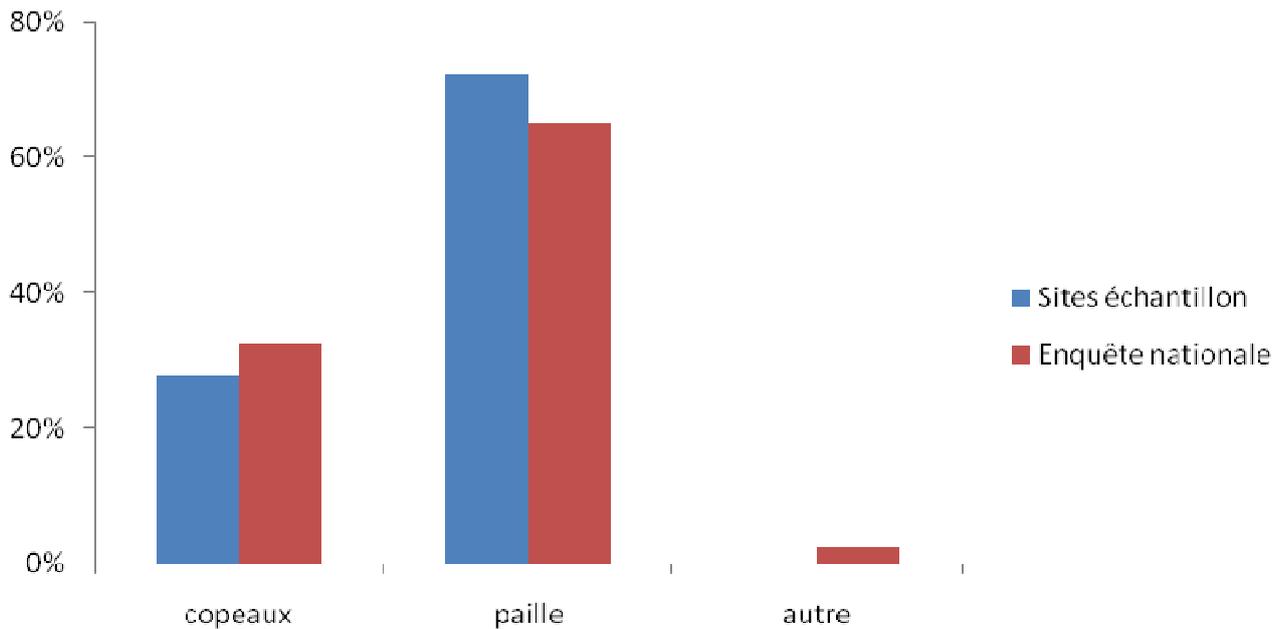
**Figure 4 : Comparaison des modes de logements des centres échantillonnés et des centres enquêtés.**



## 2.6 Litière utilisée

En terme de litière utilisée, l'échantillonnage correspond assez bien aux habitudes observées dans les centres enquêtés, en effet, l'utilisation de paille est plus répandue que l'utilisation de copeaux et dans le panel échantillonnés 5 fumiers sur 18 sont à base de litière copeaux et 13 sur 18 sont à base de litière paille.

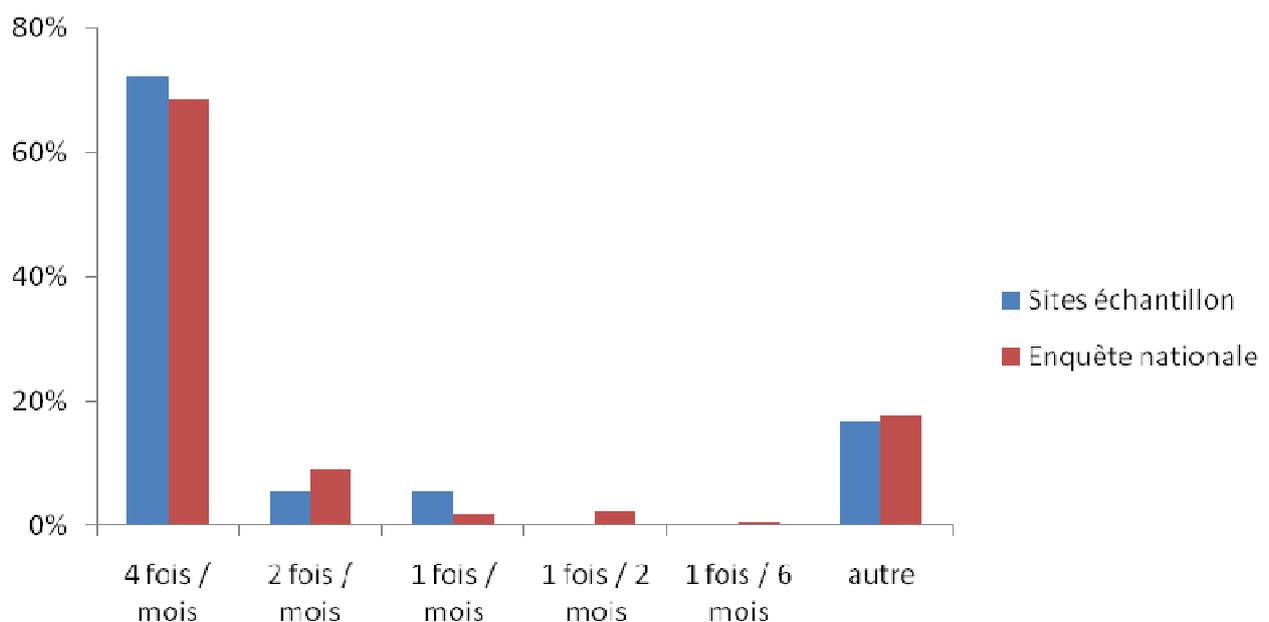
**Figure 5 : Comparaison des litières utilisées dans les centres échantillonnés et dans les centres enquêtés.**



## 2.7 Fréquence de curage

Le panel échantillonné représente correctement les habitudes en matière de fréquence de curage. La fréquence la plus habituelle étant un curage 4 fois par mois (soit 1 fois par semaine).

**Figure 6 : Comparaison des centres échantillonnés et des centres enquêtés selon la fréquence de curage.**

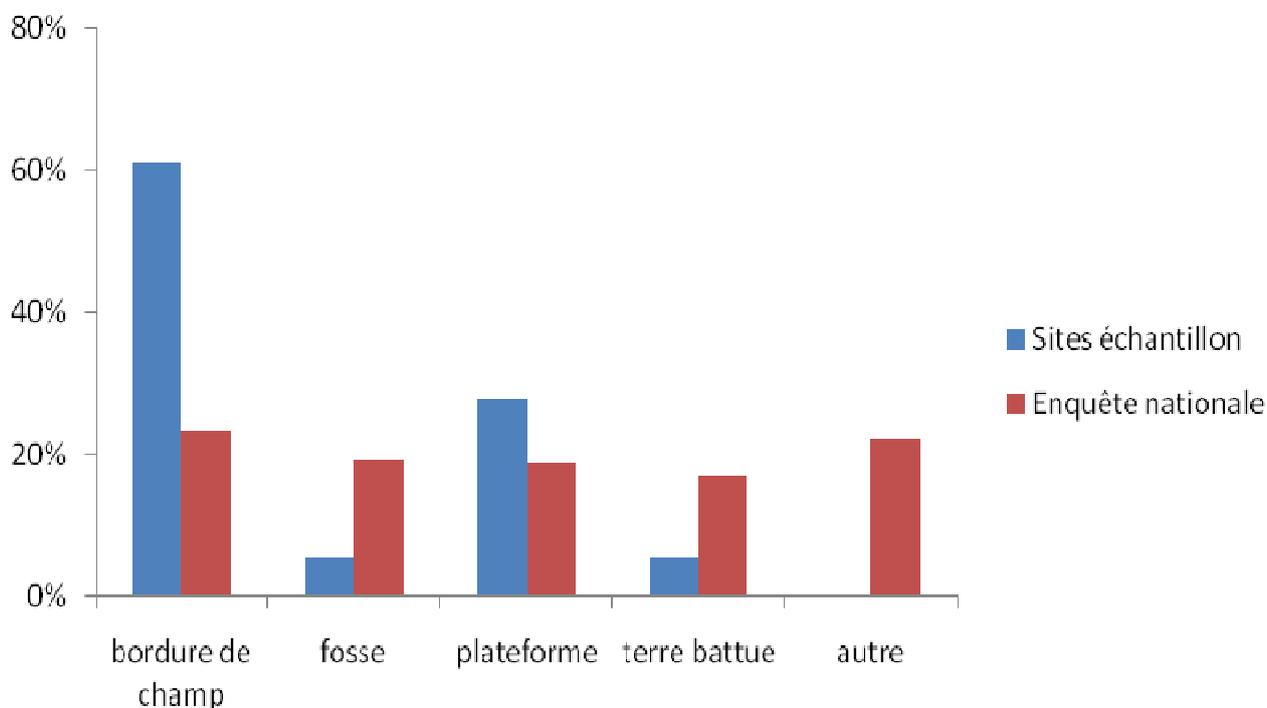


## 2.8 Mode et durée de stockage

Concernant le mode et la durée de stockage des fumiers, l'échantillonnage de seulement 6 fumiers lors de la première campagne n'a évidemment pas permis de couvrir la totalité des solutions répertoriées par l'enquête nationale. L'échantillonnage de 12 fumiers supplémentaires a permis d'être plus complet.

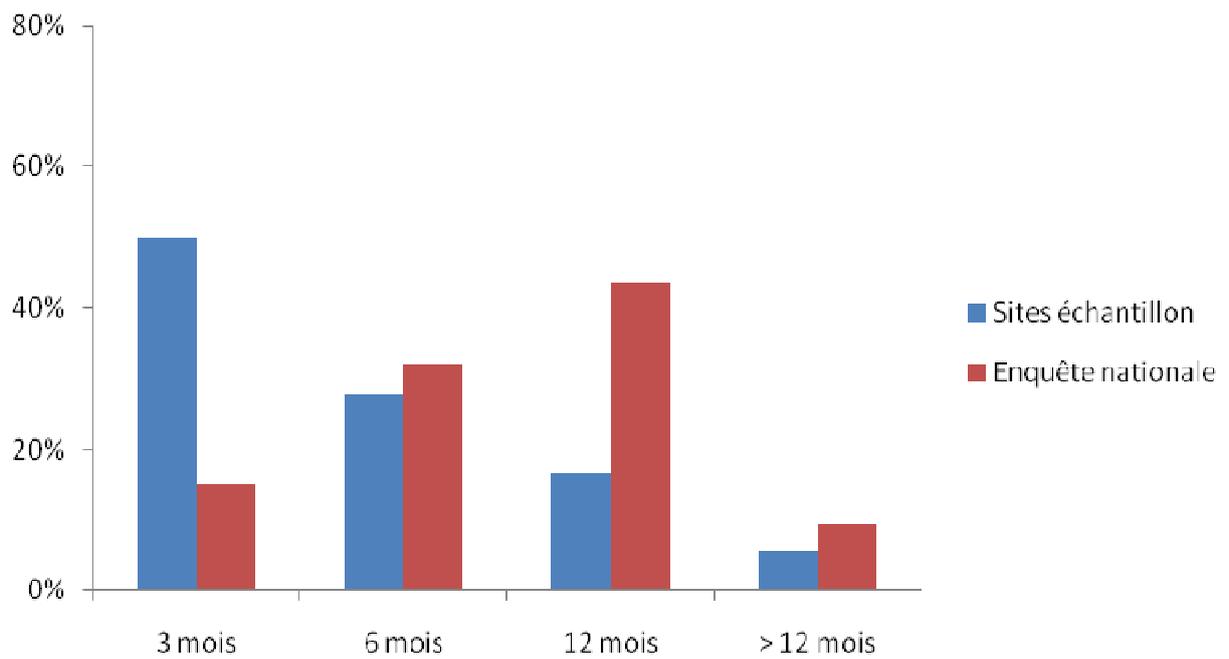
Les modes de stockage du fumier dans les centres enquêtés sont répartis de manière homogène entre les différentes solutions : bordure de champ, fosse, plateforme, terre battue et autre. La grande majorité des sites échantillonnés stocke le fumier en bordure de champ ainsi que sur une plateforme. Ces deux catégories sont légèrement surreprésentées par l'échantillonnage, cependant la totalité des modes de stockage est représentée.

**Figure 7 : Comparaison des modes de stockage du fumier entre les centres échantillonnés et les centres enquêtés**



La durée de stockage du fumier des sites enquêtés est très variable. Elle peut aller de 3 mois à plus d'un an. La majorité (environ 40%) cependant stocke le fumier pendant un an. 3 des sites échantillonnés caractérisent cette catégorie. La catégorie « 3 mois » est très représentée (9 sites) alors que ce n'est pas la plus courante. La catégorie « 6 mois » est représentée dans les mêmes proportions que dans l'enquête nationale.

Figure 8 : Comparaison des durées de stockage du fumier entre les centres échantillonnés et les centres enquêtés



### 3 Bilan général des campagnes analytiques sur fumier de cheval

L'objectif du projet est de caractériser un panel de fumiers de cheval issus de centres sélectionnés et représentatifs du paysage national de manière à aider au choix des filières de valorisation les plus pertinentes selon les produits « fumier ».

La comparaison des caractéristiques des sites échantillonnés avec celles des centres recensés lors de l'enquête nationale a montré que le panel de l'étude est assez représentatif des centres hippiques français en terme de typologie d'échantillonnage, de répartition géographique, d'effectifs, de mode de logement, de litière utilisée, fréquence de curage, de mode et de durée de stockage.

Cette partie comporte la totalité des résultats d'analyse des 18 fumiers dont 6 sont issus de la première campagne et 12 de la seconde. 5 de ces fumiers ont une litière copeaux de bois et 13 une litière paille.

Les fumiers ont subi les analyses suivantes afin de valider la faisabilité des différentes filières de valorisation :

- une caractérisation agronomique,
- deux tests de compostabilité : détermination de l'espace lacunaire et test de respirométrie.
- un test de potentiel méthanogène
- une analyse des caractéristiques thermiques : pouvoir calorifique, taux de cendres, taux de silice, potentiométrie et taux de soufre.

La totalité des résultats sont en annexe.

Pour rappel, voici les différents fumiers échantillonnés :

**Tableau 2 : Présentation des échantillons en fonction du type de litière et de la campagne d'échantillonnage**

Type de litière	Nom échantillon	Campagne analytique
copeaux	Fumier 1	1 <sup>ière</sup>
	Fumier 4	1 <sup>ière</sup>
	C2	2 <sup>ième</sup>
	C3	2 <sup>ième</sup>
	C4	2 <sup>ième</sup>
paille	Fumier 2	1 <sup>ière</sup>
	Fumier 3	1 <sup>ière</sup>
	Fumier 5	1 <sup>ière</sup>
	Fumier 6	1 <sup>ière</sup>
	P 1-1	2 <sup>ième</sup>
	P 1-3	2 <sup>ième</sup>
	P 2-1	2 <sup>ième</sup>
	P 2-2	2 <sup>ième</sup>
	P 2-3	2 <sup>ième</sup>
	P 2-4	2 <sup>ième</sup>
	P 2-5	2 <sup>ième</sup>
	P 3-1	2 <sup>ième</sup>
	P 3-2	2 <sup>ième</sup>

### 3.1 Analyse de la composition biochimique des fumiers

#### 3.1.1 Humidité et matière organique

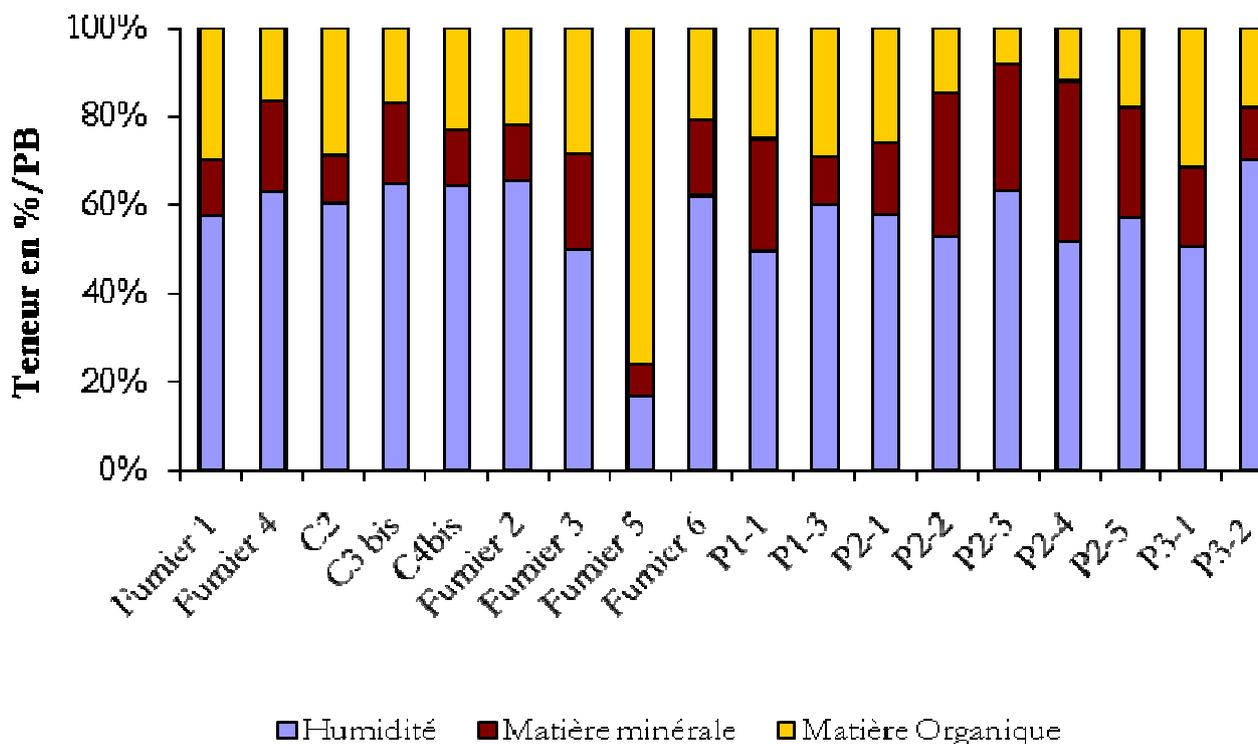
Les résultats des analyses sur les 18 fumiers confirment les tendances de la première campagne analytique. On note une forte hétérogénéité de l'humidité des fumiers. Les teneurs varient de 16,8% à 82,3%. Le fumier le plus sec est pailleux (fumier 5) et issu d'un hippodrome.

Les teneurs en matière organique varient de manière forte entre les échantillons de fumiers. Le fumier 5 se démarque des autres avec une teneur en matière organique de plus de 90% par rapport à la matière organique. La teneur moyenne est de 77,8%, ce qui est comparable à des valeurs de fumiers de bovins.

**Tableau 3 : Composition des fumiers en humidité, MS, MO**

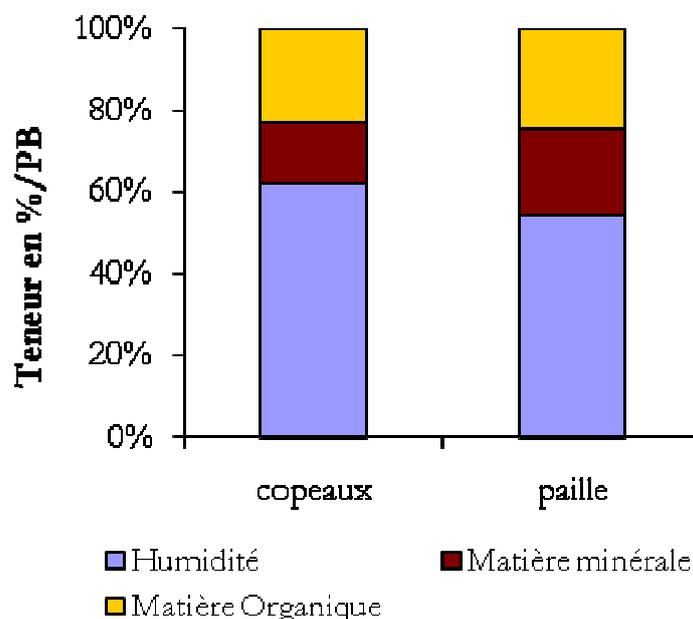
Paramètres		moyenne	mini	maxi	médiane
Humidité	% PB	64,9	16,8	82,3	67,95
Matière sèche	% PB	35,1	17,7	83,2	32,05
Matière minérale	% PB	22,2	7,2	48,0	19,7
Matière organique	% PB	27,8	11,0	77,2	24,9
Matière organique	% MS	77,8	52,0	92,8	80,3

**Figure 9 : Teneur des fumiers en Humidité, matière minérale et matière organique**



Les fumiers issus de litière à base de copeaux sont relativement plus humides, 70% d'humidité en moyenne contre 63% pour les fumiers pailleux.

Figure 10 : Teneur des fumiers en humidité, MS, MO en fonction du type de litière



### 3.1.2 Macroéléments [NPK]

La teneur en azote total varie peu entre les différents fumiers. La valeur moyenne est de 13,8 g par kg de matière sèche. Ceci permet l'apport de fertilisant entre 2 et 7 kg par mètre cube de fumier. A noter qu'il s'agit principalement d'azote organique pour lequel il faudra tenir compte d'un coefficient de minéralisation lors de l'élaboration du plan d'épandage.

Les teneurs en phosphore sont plus faibles que celles de l'azote. La teneur moyenne est de 8,7 g par kg de matière sèche, ce qui représente une valeur fertilisante située entre 1 et 5 kg par mètre cube de fumier.

Les teneurs en potassium sont élevées (24,1 g/kg MS). On note des écarts plus importants entre les fumiers mais les tendances restent identiques. L'apport en potassium varie de 2 à 15 kg par mètre cube de fumier.

Tableau 4 : Composition des fumiers en macroéléments NPK

Paramètres		moyenne	mini	maxi	médiane
Azote total	g/kg de MS	13,8	7,3	25,1	12,15
Azote organique	g/kg de MS	12,4	6,1	25,0	11,4
Azote ammoniacal	g/kg de MS	1,4	0,0	5,2	1
Azote nitrique	g/kg de MS	0,0	0,0	0,2	0,0
Phosphore	g/kg de MS	8,7	2,3	19,3	7,73
Potassium	g/kg de MS	24,1	7,8	46,6	22,3

Figure 11 : Teneur des fumiers en éléments NPK en g/kg de MS

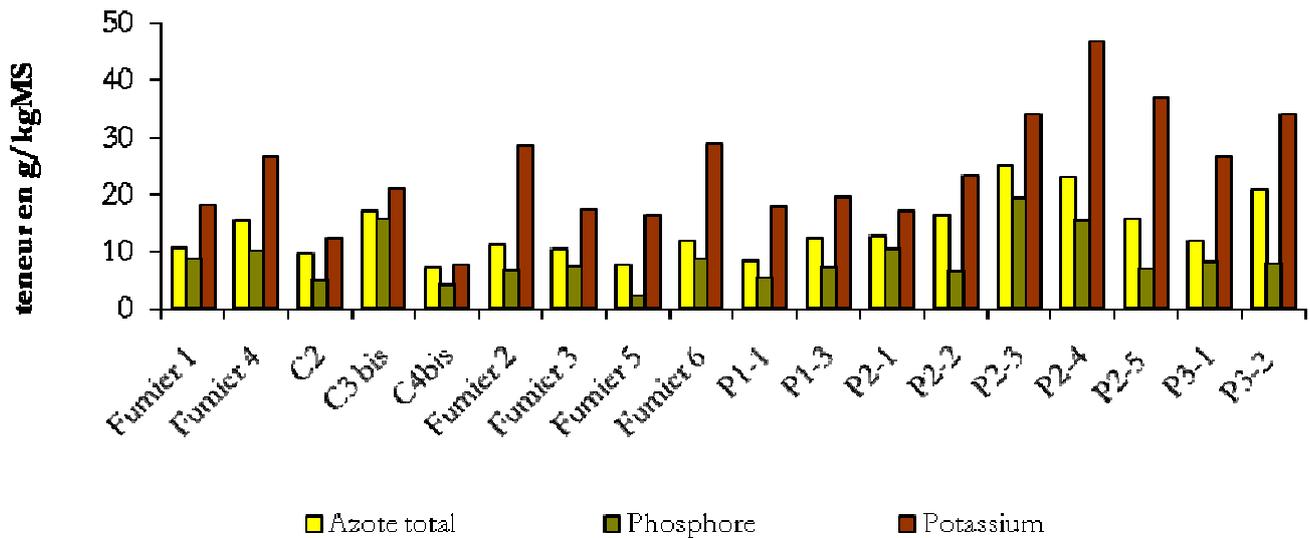
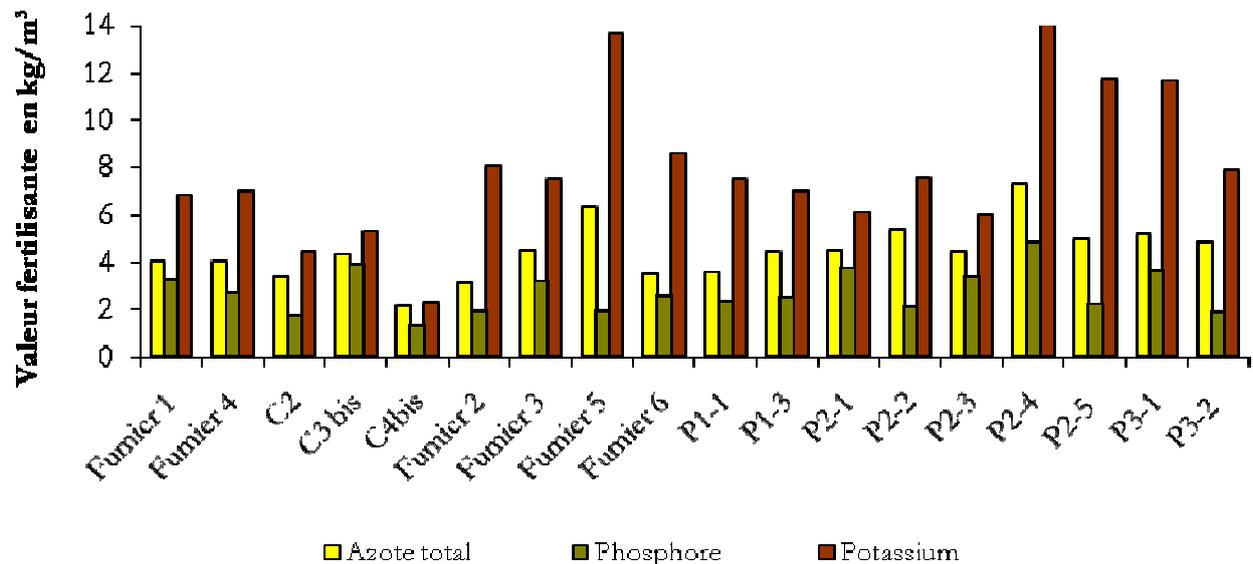
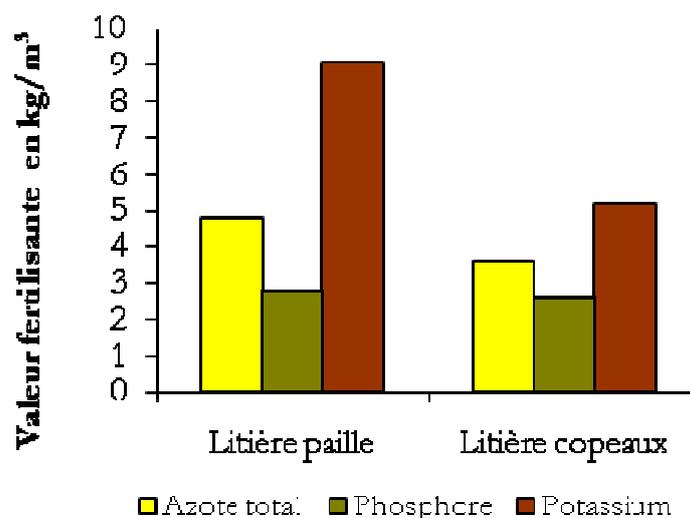


Figure 12 : Teneur des fumiers en éléments NPK en kg/m<sup>3</sup>



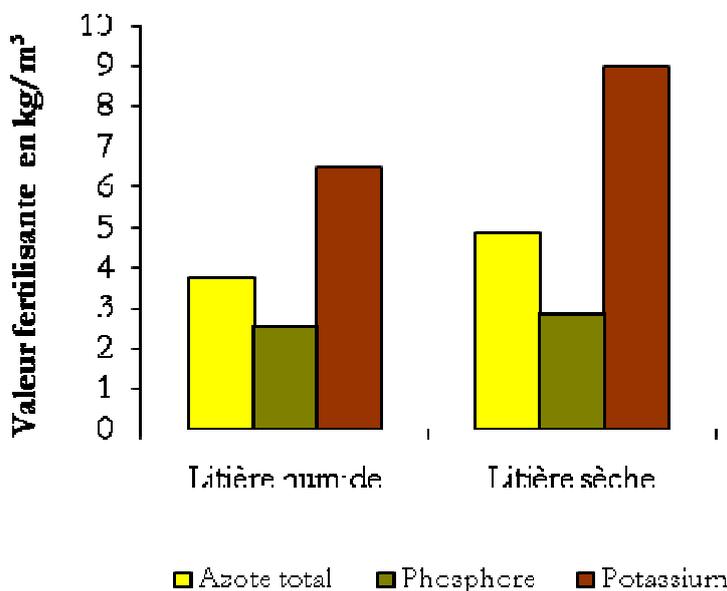
Les valeurs fertilisantes moyennes varient peu en fonction de la nature de la litière utilisée. A noter que le potassium est plus élevé lorsqu'on utilise une litière à base de paille de céréale, ceci étant lié à l'apport par le végétal.

Figure 13 : Comparaison des valeurs fertilisantes des fumiers selon le type de litière : paille ou copeaux



Les valeurs fertilisantes moyennes varient également peu en fonction de l'humidité des fumiers. Signalons que seul le fumier 5 présente une humidité bien inférieure à la moyenne des fumiers échantillonnés, ce qui impacte directement les concentrations en éléments fertilisants. La concentration en potassium des litières sèches est cependant plus élevée, cela est dû au fait que les litières les plus sèches sont les litières pailles, plus riches en potassium.

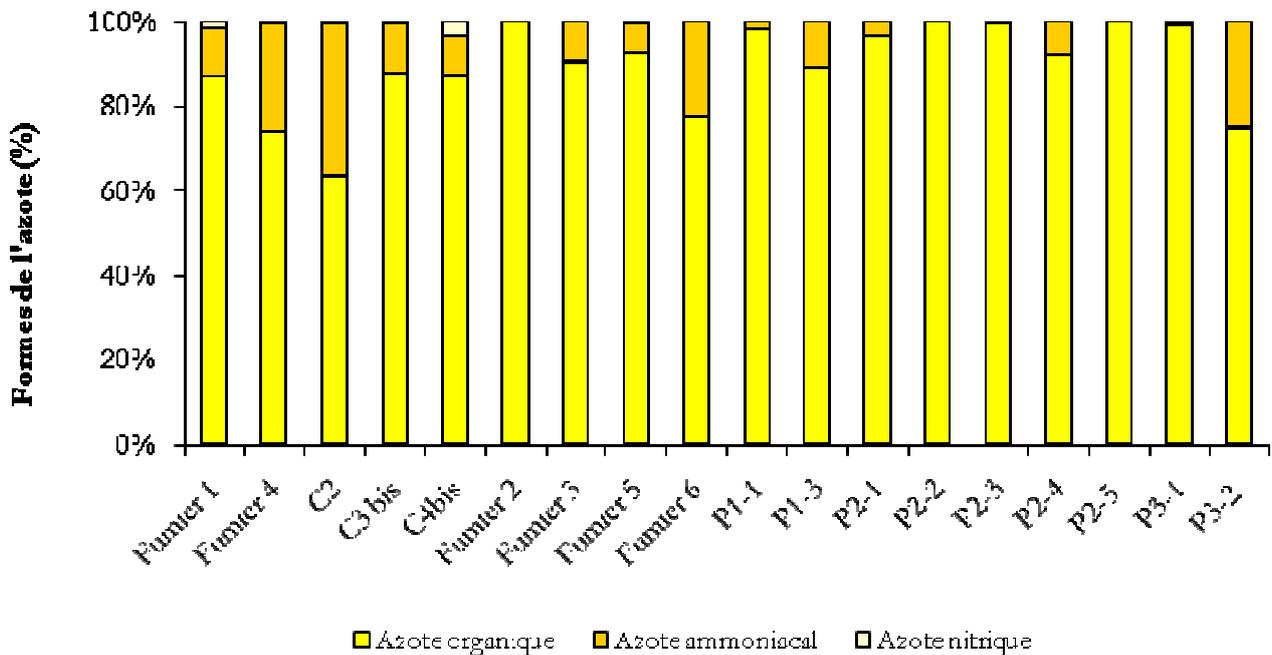
Figure 14 : Comparaison des valeurs fertilisantes des fumiers selon le type de litière : humide ou sèche



La forme organique de l'azote est largement majoritaire pour l'ensemble des échantillons de fumier. La teneur en azote ammoniacal varie de 0 à 1%. Seul le fumier 1 présente de l'azote nitrique. Ceci montre que la plupart des fumiers sont stockés en condition d'anaérobiose (présence quasi exclusive d'ammoniaque). D'un point de vue de la fertilisation et de l'utilisation de l'azote par des végétaux, les fumiers équinés sont intéressants car ils amènent de l'azote organique qui sera minéralisé au cours du temps selon les conditions pédoclimatiques locales. Un coefficient d'efficacité azote en année

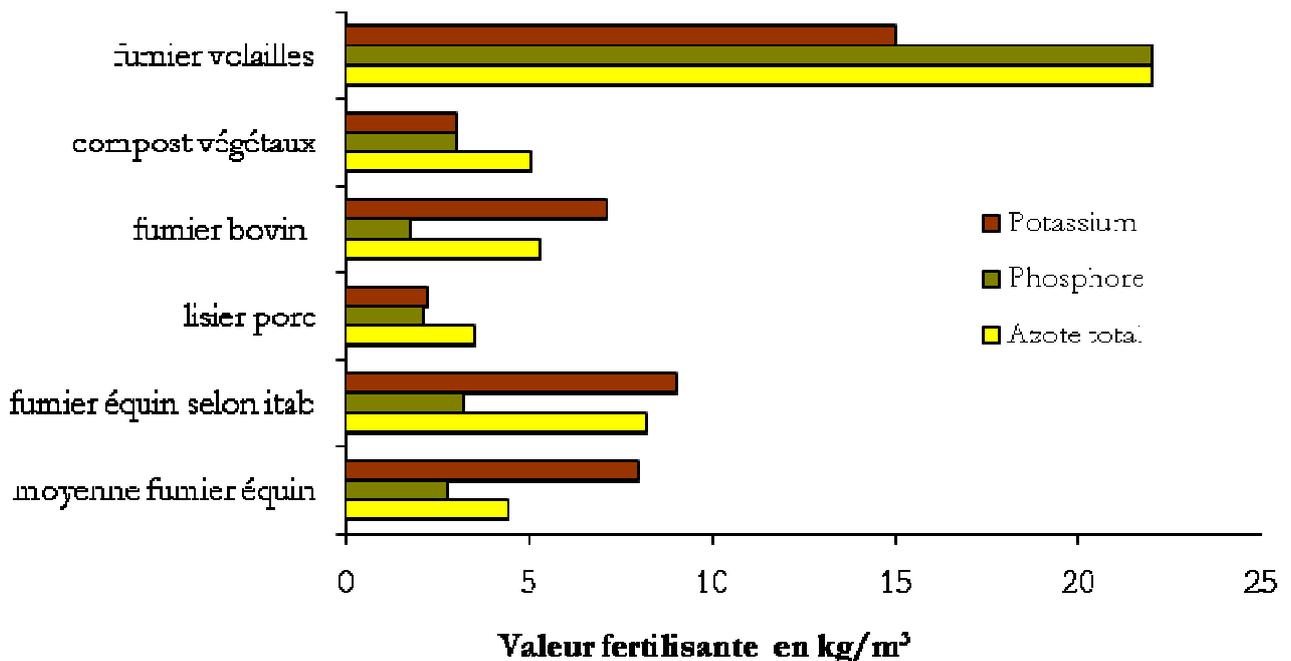
1 est à déterminer pour tenir compte de l'azote réellement disponible pour la croissance du végétal. Il est variable de 20 à plus de 40%.

Figure 15 : Composition des fumiers en formes azotées.



Les fumiers échantillonnés présentent des caractéristiques de valeur fertilisante comparables aux autres matières organiques habituellement utilisées en épandage agricole. A noter une teneur moyenne en azote plus faible dans l'échantillon par rapport aux données de la littérature. A noter également la teneur élevée en potassium des fumiers équin. En utilisation comme fertilisant organique, le fumier équin est à rapprocher des pratiques habituelles de fertilisation avec les fumiers bovins.

Figure 16 : Comparaison de la valeur fertilisante des fumiers avec d'autres types de matière organique



### 3.1.3 Eléments traces métalliques

L'analyse de la composition en ETM des fumiers a été réalisée lors de la première campagne. Il ressort que les teneurs en éléments traces métalliques sont faibles. Certains composés n'ont pu être détectés (au seuil de détection de l'analyse normée) comme le cadmium, le mercure, l'arsenic.

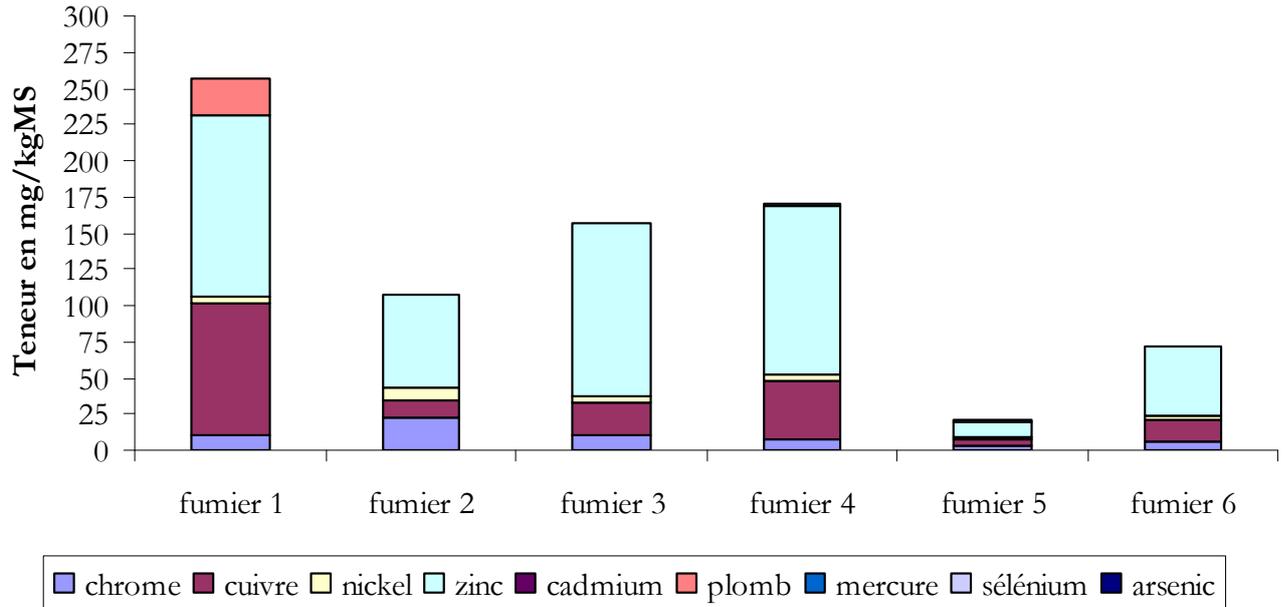
Les teneurs sont proches entre les différents échantillons de fumier. Le cuivre et le zinc sont les éléments majoritaires. Rappelons qu'il s'agit d'oligoéléments indispensables au bon fonctionnement des cellules vivantes (souvent des cofacteurs enzymatiques) et qu'il ne s'agit pas d'éléments toxiques. C'est la dose d'utilisation du produit qui engendrera éventuellement une toxicité.

Notons que les concentrations en cuivre et en zinc sont les plus élevées dans le cadre du fumier 1. Ce même fumier est également le seul à contenir du plomb. La nature de la litière joue certainement à ce niveau (litière reconstituée, marque®).

**Tableau 5 : Composition des fumiers en éléments traces métalliques**

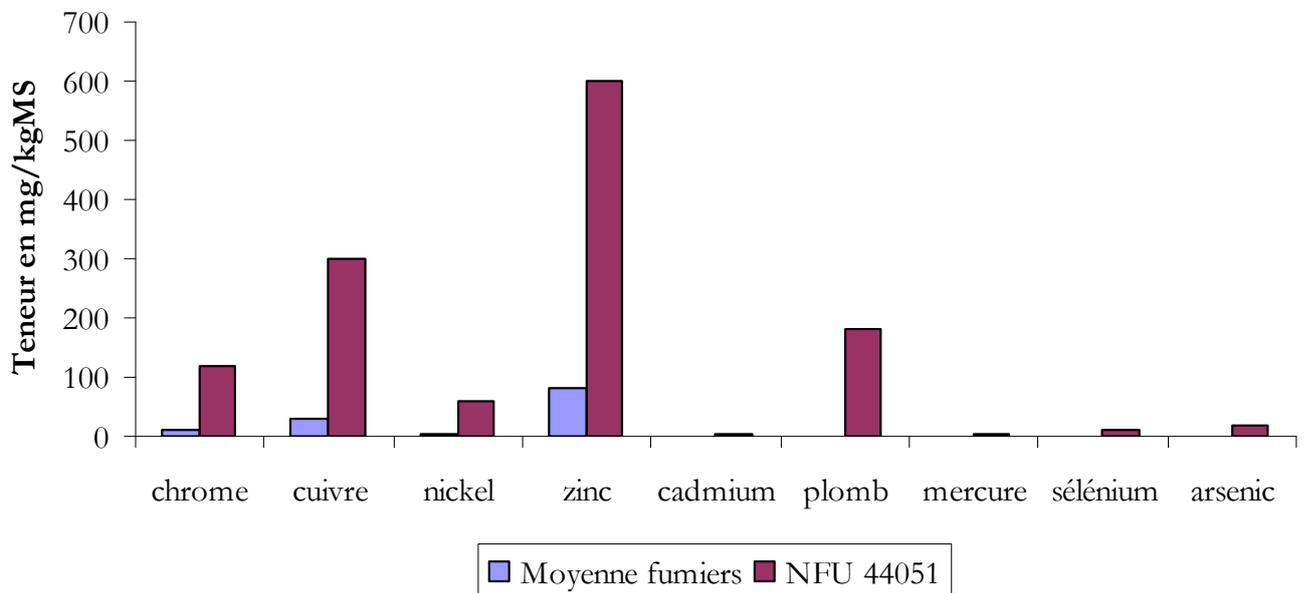
Paramètres		fumier 1	fumier 2	fumier 3	fumier 4	fumier 5	fumier 6	moy.	mini	maxi	méd.
chrome	mg/kg de MS	10	22.1	10	7.8	3.1	5.8	9.8	3.1	22.1	8.9
cuivre	mg/kg de MS	92	12.4	22.5	40.6	4.3	15.3	31.2	4.3	92.0	18.9
nickel	mg/kg de MS	3.7	8.5	4.5	4.4	1.5	2.8	4.2	1.5	8.5	4.05
zinc	mg/kg de MS	125	63.9	120	116	11.0	47.2	80.5	11.0	125.0	89.95
cadmium	mg/kg de MS	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-
plomb	mg/kg de MS	25.8	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-
mercure	mg/kg de MS	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-
sélénium	mg/kg de MS	0.6	<LD	<LD	0.9	0.3	0.6	0.6	0.3	0.9	0.6
arsenic	mg/kg de MS	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-

Figure 17 : Teneur des fumiers en éléments traces métalliques.



Les teneurs en éléments traces métalliques dans les échantillons de fumiers restent très faibles. On peut comparer ces teneurs à celles imposées par la norme NFU 44-051 pour se rendre compte de la conformité de ces produits.

Figure 18 : Comparaison des teneurs en éléments traces métalliques des fumiers avec la norme NFU 44051



Les résultats des analyses de la première campagne analytique ont montré que, en comparaison avec les exigences de la norme NFU 44-051, la teneur en éléments traces métalliques ne pose pas de problème. Ainsi, ce paramètre n'a pas fait l'objet d'analyse lors de la seconde campagne analytique. A noter que ce paramètre reste tout

de même à contrôler dans le cadre d'une valorisation agronomique du produit (plan d'épandage, normalisation...).

### 3.1.4 Critères microbiologiques

L'analyse de la qualité microbienne des produits s'est faite selon les exigences de la norme NFU 44-051 relative aux amendements organiques. Elle détermine les critères microbiologiques sur deux familles de pathogènes : les salmonelles et les œufs d'helminthes viables. L'absence d'éléments pathogènes est indispensable pour envisager l'utilisation du produit se référant à la norme.

Dans le cas des analyses réalisées, on constate l'absence de ces pathogènes dans tous les fumiers échantillonnés.

**Tableau 6 : Eléments pathogènes des fumiers**

		fumier 1	fumier 2	fumier 3	fumier 4	fumier 5	fumier 6
Salmonelles	/25g MB	absence	absence	absence	absence	absence	absence
Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB	absence	absence	absence	absence	absence	absence

De la façon même que pour la concentration en ETM, les résultats des analyses de la première campagne analytique ont montré que la teneur en éléments pathogènes microbiologiques ne pose pas de problème. Ainsi, ce paramètre n'a pas fait l'objet d'analyse lors de la seconde campagne analytique, il reste cependant à vérifier dans le cas d'une valorisation agronomique du produit.

## 3.2 Caractérisation de la compostabilité des fumiers

Dans un premier temps, la réussite du compostage d'un fumier dépend de son humidité et de sa composition : il est nécessaire d'avoir un bon équilibre entre les concentrations en azote et en carbone pour le bon fonctionnement de la flore microbienne.

La capacité d'un fumier à être composté dépend également de paramètres physiques. En effet le compostage est la dégradation de la matière organique en mode aérobie. Il faut donc que la structure du fumier permette le passage de l'air. Aussi l'espace lacunaire de chaque fumier a été déterminé et un test de compressibilité a été mené. On se rapportera à l'annexe pour avoir plus de détails sur ce test.

Enfin, un test de respirométrie a été réalisé afin d'observer les caractéristiques du processus du compostage de chaque fumier. On se reportera également à l'annexe pour plus d'information sur ce test.

### 3.2.1 Paramètres techniques

Pour pouvoir envisager le compostage d'un produit, on considère que son humidité doit être comprise entre 50 et 60%. Ainsi, l'humidité des fumiers étudiés varie de 16,8 à 73,8. 3 fumiers sont trop humides et le fumier n°5 est beaucoup trop sec. Le pH se situe entre 6 et 8, plage optimale pour le développement bactérien. Les rapports C/N sont corrects. Le C/N du fumier 4 est un peu faible mais cela correspond à une forte teneur en azote ce qui aura peu d'influence sur la compostabilité de ce fumier. Par

contre le C/N du fumier 5 est trop élevé, il manque de l'azote ; cela risque d'impacter sur la vitesse de dégradation

**Tableau 7 : Paramètres techniques de la compostabilité des fumiers**

Paramètres	fumier 1	fumier 2	fumier 3	fumier 4	fumier 5	fumier 6	moy.	mini	maxi	méd.
Humidité (%)	62.1	71.9	56.6	73.8	16.8	70.4	58.6	16.8	73.8	66.25
pH :	7.8	7.6	7.2	8.3	6.2	7.9	7.5	6.2	8.3	7.7
C / N :	40.6	38.2	36.2	24.5	61.0	33.8	39.1	24.5	61.0	37.2

### 3.2.2 Paramètres physiques

Il existe une très grande variabilité de la masse volumique entre les fumiers puisqu'elle est en moyenne de 171 kg/m<sup>3</sup> avec un minimum de 14 et un maximum de 418 kg/m<sup>3</sup>.

L'espace lacunaire des fumiers est également très variable. Pour réaliser un compostage en aération naturelle, il est admis que l'espace lacunaire doit être supérieur à 35%. Les fumiers 2, 4 et 6 sont donc à la limite. Ainsi, on peut calculer la hauteur maximum des andains. Cette hauteur est elle aussi très variable selon les fumiers. Les trois fumiers dont l'espace lacunaire est inférieur ou égal à 30% (fumiers 2, 4 et 6) présentent donc des limites pour être compostés en andain, il s'agit également de ceux dont l'humidité est supérieure à 70%. Ces andains ne devraient pas dépasser 2m de haut.

**Tableau 8 : Paramètres physiques de la compostabilité des fumiers**

Paramètres		fumier 1	fumier 2	fumier 3	fumier 4	fumier 5	fumier 6	moy.	mini	maxi	méd.
Masse volumique	g/L	297.0	131.0	58.0	418.0	14.0	109.0	171.2	14.0	418.0	120
Espace lacunaire (hauteur 3 m)	%	42.0	30.0	48.0	27.0	68.0	28.0	40.5	27.0	68.0	36
Hauteur maximum (espa. lacu. 35%)	m	>3	2.0	>3	1.5	>3	2.0	1.8	1.5	2.0	2

### 3.2.3 Paramètres cinétiques

Les comportements cinétiques des différents fumiers sont comparables.

Au début de l'essai (t=0), les besoins en oxygène varient d'un facteur 2,3 entre les 6 fumiers sans corrélation avec la nature de la litière. C'est le début de la phase active de biodégradation qui va durer une dizaine de jours. L'activité connaît, pendant cette période, une décroissance rapide.

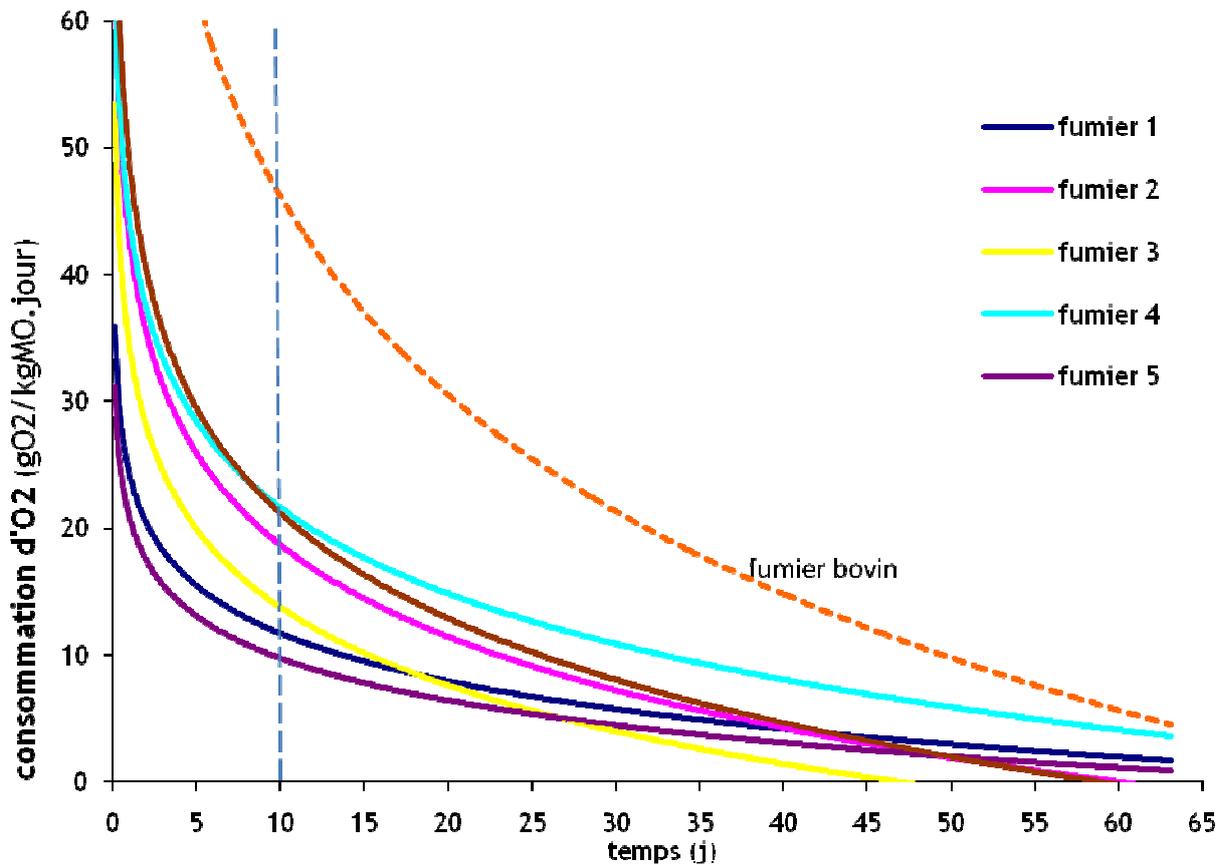
A la fin de cette période (t = 10 jours), le comportement des produits est alors relativement différent avec une consommation d'oxygène qui varie d'un facteur 3 entre les différents fumiers. C'est la fin de la phase active de biodégradation microbienne (assimilable à une phase thermophile en compostage).

A la fin de l'essai (t= 60 jours), l'évolution des fumiers en conditions aérobies est manifeste et les comportements très différents. Les fumiers 2, 3 et 6 ont fini leur

maturation aérobie et les fumiers 1, 4 et 5 poursuivent leur maturation à des niveaux de consommation d'oxygène très réduits. On note alors que la composition de la litière influence fortement l'évolution aérobie puisque les fumiers 1 et 4 continuent leur maturation (litière copeaux de bois). Le fumier 5 a également une activité aérobie résiduelle comparable aux fumiers à base de copeaux ; rappelons qu'il est très riche en paille.

Cette différence de comportement en fonction de la litière utilisée peut également s'illustrer par le taux de dégradation aérobie de la matière organique. Les fumiers 1 et 4 ont les taux les plus importants.

Figure 19 : cinétiques de consommation d'O<sub>2</sub> lors du compostage



La figure montre que les fumiers équins ont le même type de comportement de biodégradation aérobie : une dégradation rapide pendant les 10 premiers jours puis une phase de maturation plus lente. Ce comportement est très différent de celui obtenu avec un fumier de bovin. En effet en 1 mois d'aération les fumiers ont déjà atteints un degré de maturité important.

Les tests de compostabilité n'ont pas été réalisés lors de la deuxième campagne car le compost de fumier équin fera l'objet d'une étude séparée.

### 3.3 Caractérisation de l'intérêt des fumiers en méthanisation

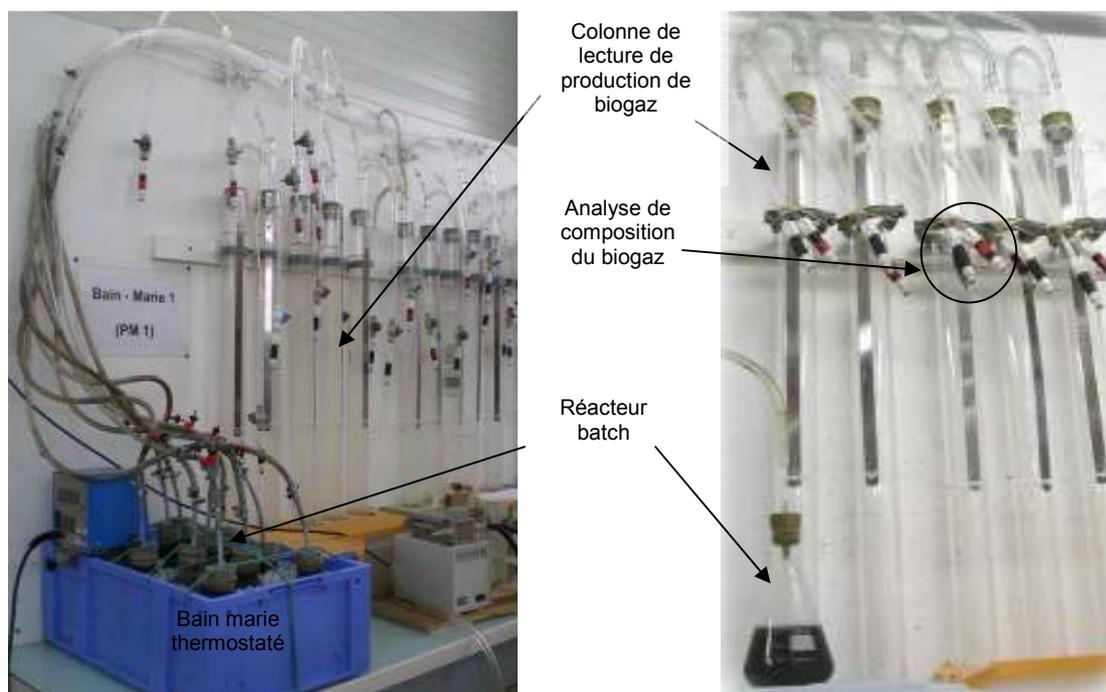
Un test de potentiel méthanogène (TPM) a été réalisé sur 6 fumiers de la première campagne analytique ainsi que sur 6 autres fumiers de la seconde campagne.

Ces derniers ont été choisis de manière à tester des échantillons les plus hétérogènes possible afin d'avoir une plus grande représentativité.

Ce test permet de déterminer pour chaque fumier, la production de biogaz, les teneurs en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> ainsi que la cinétique de production.

On se rapportera à l'annexe pour avoir plus d'information sur la méthode de réalisation du test de potentiel méthanogène.

**Figure 20 : Banc d'essai de détermination de potentiel méthanogène**



### 3.3.1 Niveau de biodégradation anaérobie

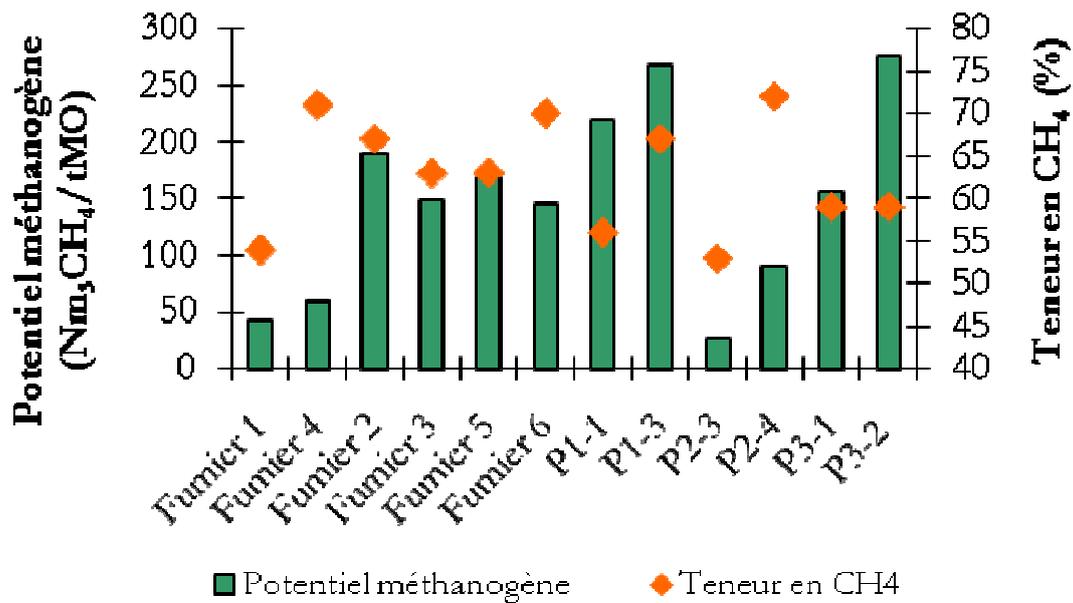
On observe une forte disparité des potentiels méthanogènes des fumiers échantillonnés.

Un fumier se dégage nettement des autres avec des performances très faibles : le potentiel méthanogène n'est que de 25 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t MO pour une qualité de biogaz médiocre (53% de CH<sub>4</sub>) et seulement 6% de matière organique initiale dégradée. Il s'agit du fumier sur litière paille n° P2-3. On peut supposer que ce fumier contient un inhibiteur de la méthanogénèse.

**Tableau 9 : Niveau de biodégradation anaérobie des fumiers**

Paramètres		moyenne	mini	maxi	médiane
Production de biogaz	Nm <sup>3</sup> /tPB	75	6	186	64
	Nm <sup>3</sup> /tMO	235	46	464	249
Potentiel méthanogène	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tMO	149	25	275	152
Teneur en CH <sub>4</sub>	%	63	53	72	63
Taux de dégradation anaérobie	% MO	27	6	56	29

Figure 21 : Potentiels méthanogènes et teneur en CH<sub>4</sub> des fumiers



La mesure des potentiels méthanogènes permet de distinguer très nettement deux familles de fumiers : les fumiers à base « litière de paille » et les fumiers à base « copeaux de bois ». Nous avons déjà noté cet aspect lors de la première campagne analytique, aussi les 6 tests de potentiels méthanogènes se sont portés sur des fumiers à base de paille.

Les potentiels méthanogènes des « fumiers paille » varient entre 90 et 275 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tMO (sans prendre en compte le fumier P2-3 qui a un potentiel méthanogène de 25 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tMO). Les teneurs en méthane sont élevées et supérieures à 60% (sauf l'échantillon P2-3 qui a une teneur du biogaz en méthane de 53%). Les potentiels des « fumiers copeaux de bois » sont plus faibles. Les valeurs mesurées sont de 43 et de 59 Nm<sup>3</sup>/t MO. Ces valeurs sont très faibles. A noter une teneur en méthane élevée dans le cas du fumier 4 (72%).

Tableau 10 : Résultats des TPM des fumiers sur litière copeaux

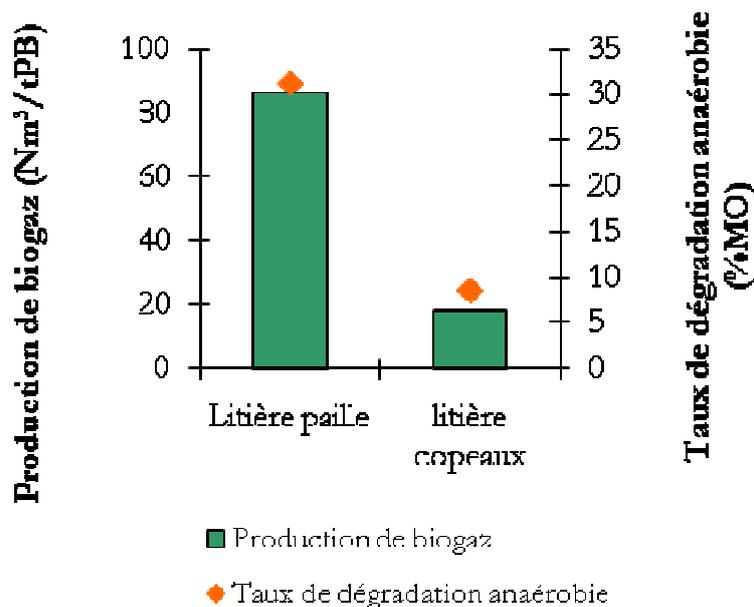
Paramètres		Fumier 1	Fumier 4	moyenne
Production de biogaz	Nm <sup>3</sup> /tPB	18	18	18
	Nm <sup>3</sup> /tMO	56	83	69,5
Potential méthanogène	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tMO	43	59	51
Teneur en CH <sub>4</sub>	%	54	71	62,5
Taux de dégradation anaérobie	% MO	8	9	8,5

**Tableau 11 : Résultats des TPM des fumiers sur litière paille**

Paramètres		Fumier 2	Fumier 3	Fumier 5	Fumier 6	P1-1	P1-3	P2-3	P2-4	P3-1	P3-2	moy.	mini	maxi
Production de biogaz	Nm <sup>3</sup> /tPB	72	89	186	50	136	124	6	24	56	119	86,2	6	186
	Nm <sup>3</sup> /tMO	285	236	265	207	389	402	46	125	263	464	268,2	46	464
Potentiel méthanogène	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tMO	190	148	168	145	219	268	25	90	156	275	168,4	25	275
Teneur en CH <sub>4</sub>	%	67	63	63	70	56	67	53	72	59	59	62,9	53	72
Taux de dégradation anaérobie	% MO	31	28	31	22	48	44	6	13	32	56	31,1	6	56

La figure suivante montre de manière encore plus explicite l'effet de la nature de la litière utilisée sur le potentiel méthanogène du fumier et sa production de biogaz. Ainsi, les fumiers à base de litière de copeaux ont des productions de biogaz très faibles. On note un facteur 5 avec les fumiers à base de litière paille. Le niveau de production se reflète sur le taux de dégradation anaérobie de la matière organique qui est de l'ordre de 8% pour les fumiers à base de litière de copeaux et de 30% pour les fumiers à base de litière de paille.

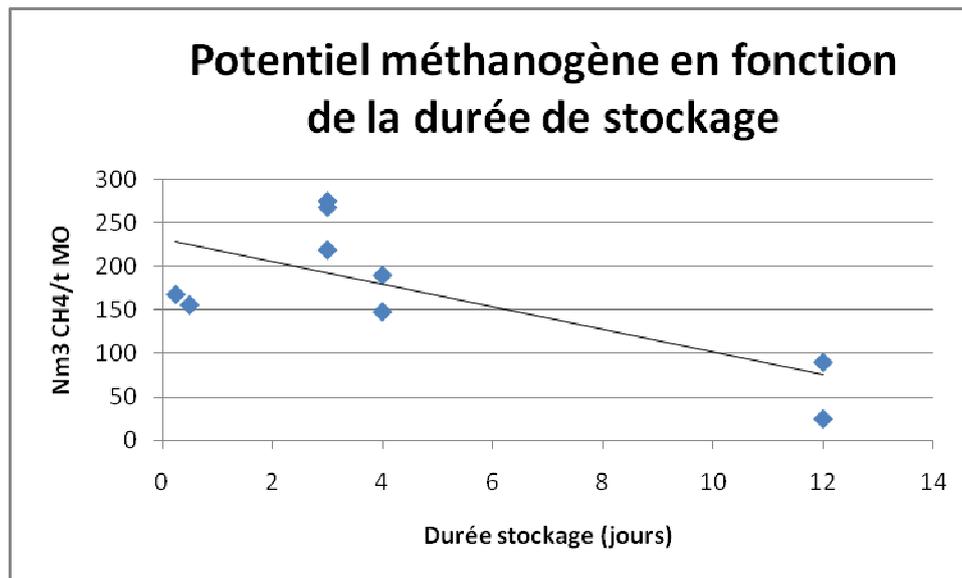
**Figure 22 : Intérêt de la méthanisation en fonction du type de litière**



Il semble que la durée de stockage du fumier ait un impact sur le potentiel méthanogène. Si on représente les potentiels méthanogènes des fumiers à base de litière paille en fonction de la durée de stockage, la corrélation est assez bonne. Il y a un seul point qui ne correspond pas à cette tendance : le fumier P3-2 qui a été stocké 12 mois et qui a un potentiel de plus de 250 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> /t MO. Cependant, l'échantillonnage de ce fumier s'est fait tardivement et rapidement. Il est probable que l'échantillonnage ait été fait sur le dessus du tas, c'est-à-dire le fumier le plus récent. Si on considère que ce fumier a en fait été stocké moins de 3 mois, la corrélation est assez

bonne. On retrouve cette corrélation si on considère le taux de dégradation de la matière organique.

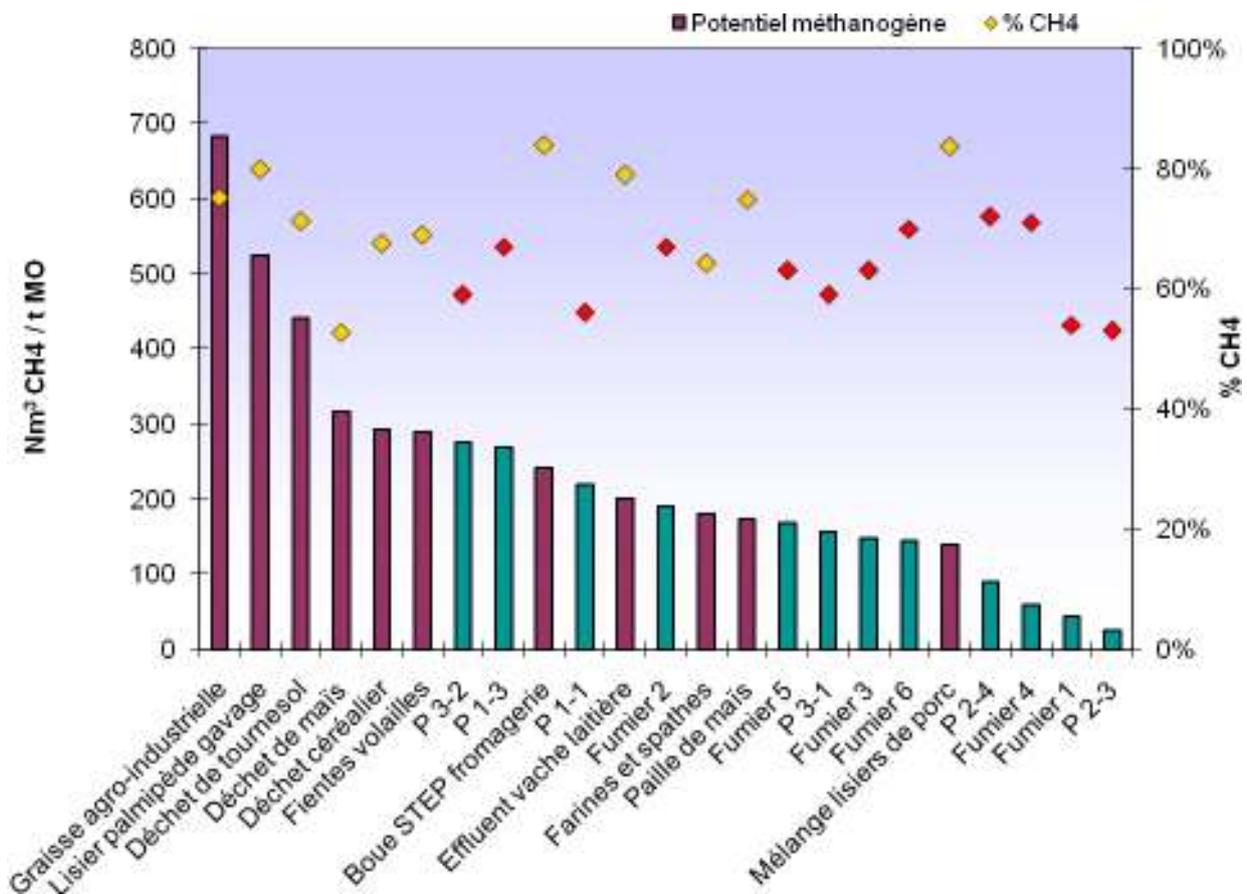
Figure 23 : Potentiel méthanogène en fonction de la durée de stockage des fumiers



### 3.3.2 Intérêt en méthanisation

Lorsqu'on positionne les potentiels méthanogènes des fumiers équins sur une échelle de valeurs constituée de potentiels méthanogènes de différents produits organiques, on constate que les fumiers à base de litière de copeaux (fumier 1 et 4) ne sont pas intéressants en terme de production de méthane et d'énergie, et que les fumiers pailleux se situent dans des productions proches des fumiers de bovins. Le fumier P 2-4 a également un potentiel faible, mais c'est aussi l'un de ceux qui est le moins riche en matière organique (52%MS). Par ailleurs, comme cela a déjà été soulevé, les deux fumiers à base de paille qui ont les potentiels les plus bas sont ceux qui ont été stocké le plus longtemps.

Figure 24 : Positionnement des PM des fumiers équins parmi d'autres types de MO



### 3.4 Caractérisation de l'intérêt des fumiers en Combustion

#### 3.4.1 Pouvoir calorifique

Pour tous les fumiers dont l'humidité se situe aux alentours de 60 - 70 %, le PCI est de 0,8 à 5,5 MJ / kg de matière brute, ce qui est très bas pour un biocombustible (ces fumiers auront donc beaucoup de mal à brûler). A titre de comparaison, les combustibles les plus humides pouvant être brûlés sont aux alentours de 60 % d'humidité, mais ont un PCI de 6 MJ / kg, il s'agit de résidus de pressage d'olive.

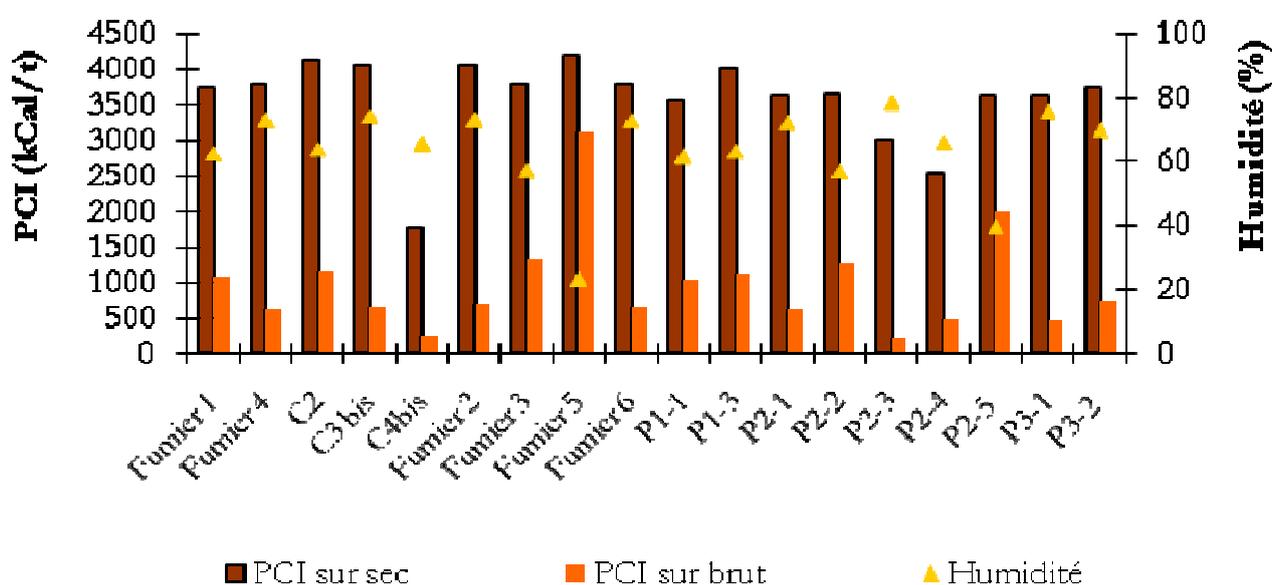
Le fumier 5, beaucoup plus sec a un PCI élevé, de l'ordre de 13 MJ/ kg de matière brute et pourrait très bien brûler. Le fumier P2-5 également plus sec a un PCI plus élevé, de l'ordre de 8 MJ/kg de matière brute et pourrait éventuellement être brûlé.

La combustion de ces fumiers nécessiterait donc de grandes dimensions de la chambre de combustion pour sécher le fumier avant combustion. On peut trouver de telles chaudières en grande puissance (> 500 kW) qui sont adaptées à des combustibles de 10 à 20 MJ / kg, mais pas en petite puissance. Pour brûler ces fumiers, il faudrait donc soit les pré-sécher avant (étape supplémentaire), soit les mélanger avec un combustible sec et énergétique de type paille sèche, bois selon la disponibilité. L'important serait de dépasser (dans le mélange entrée chaudière) une valeur PCI de 7 MJ / kg de produit brut.

**Tableau 12 : Pouvoir calorifique des fumiers**

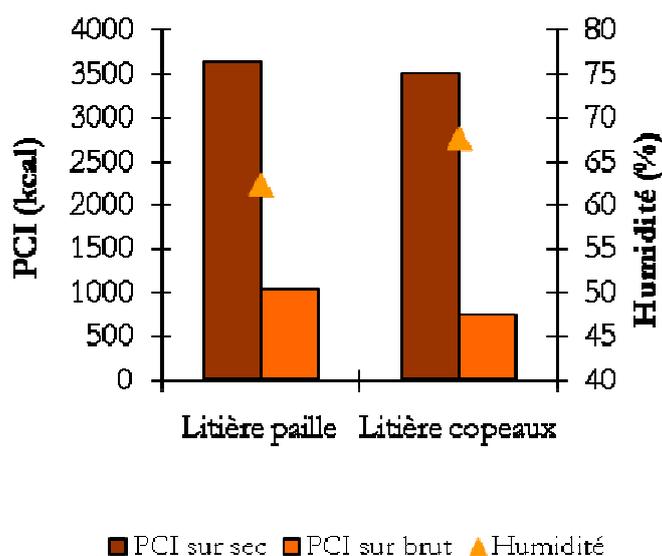
Paramètres		moyenne	mini	maxi	médiane
Humidité	%	63,8	23,0	78,7	65,9
PCI sur sec	Kcal/kg de MS	3595	1770	4192	3747
PCI sur sec	KJ/kg de MS	15050	7411	17551	15688
PCI sur brut	Kcal/kg de PB	965	205	3103	713,5
PCI sur brut	KJ/kg de PB	4038	858	12987	2987

**Figure 25 : PCI des fumiers**



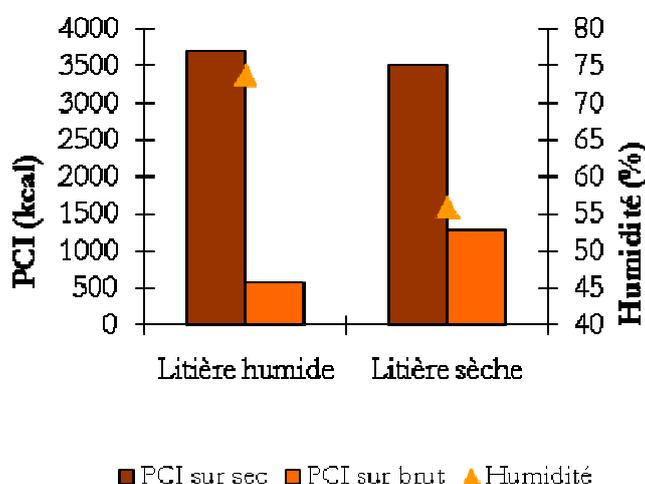
Les fumiers à base de litière de copeaux étant beaucoup plus humides, le PCI est donc évidemment plus faible. On note cependant que le fumier 1 est plus sec (62% d'humidité) que certains fumiers pailleux et a un PCI plus élevé (4,5 MJ/kg PB).

Figure 26 : Comparaison des PCI des fumiers selon le type de litière : paille ou copeaux



La différence de PCI entre les litières humide et sèche confirme bien le raisonnement selon lequel les fumiers ayant les PCI les plus forts sont les fumiers les plus secs.

Figure 27 : Comparaison des PCI des fumiers selon le type de litière : sèche ou humide



A titre de comparaison :

- le bois utilisé en chaudière présente généralement une humidité de l'ordre de 25% et un PCI de 4320 kcal/tMS (3000kcal/tPB).
- La paille a un taux d'humidité de l'ordre de 10 à 12% et un PCI de 4080 kcal/tMS (3500kcal/tPB).

### 3.4.2 Cendres et mâchefers

Les teneurs en cendres sont très élevées : jusqu'à 20 % sur matière sèche. Cette production élevée peut entraîner de multiples inconvénients : bouchages fréquents des

filtres, dépôts sur les tubes... Le traitement des fumées risque également d'être indispensable. Les dispositifs d'extraction spécifique sont à mettre en place pour éviter les dégâts liés à la production importante de cendres. La combustion peut nécessiter que la chaudière soit de taille importante (> 500 kW). Par ailleurs, il sera nécessaire de prévoir une valorisation des cendres.

A titre de comparaison, nous pouvons donner les taux de cendres de quelques combustibles bois :

- Bois sec (25% d'humidité) : 1.5 à 3%
- Ecorces (50% d'humidité) : 7 à 9%
- Sciures (20% d'humidité) : 6 à 8%
- Paille (10% d'humidité) : 2 à 4%
- Rafle maïs (25% d'humidité) : 4 à 8%

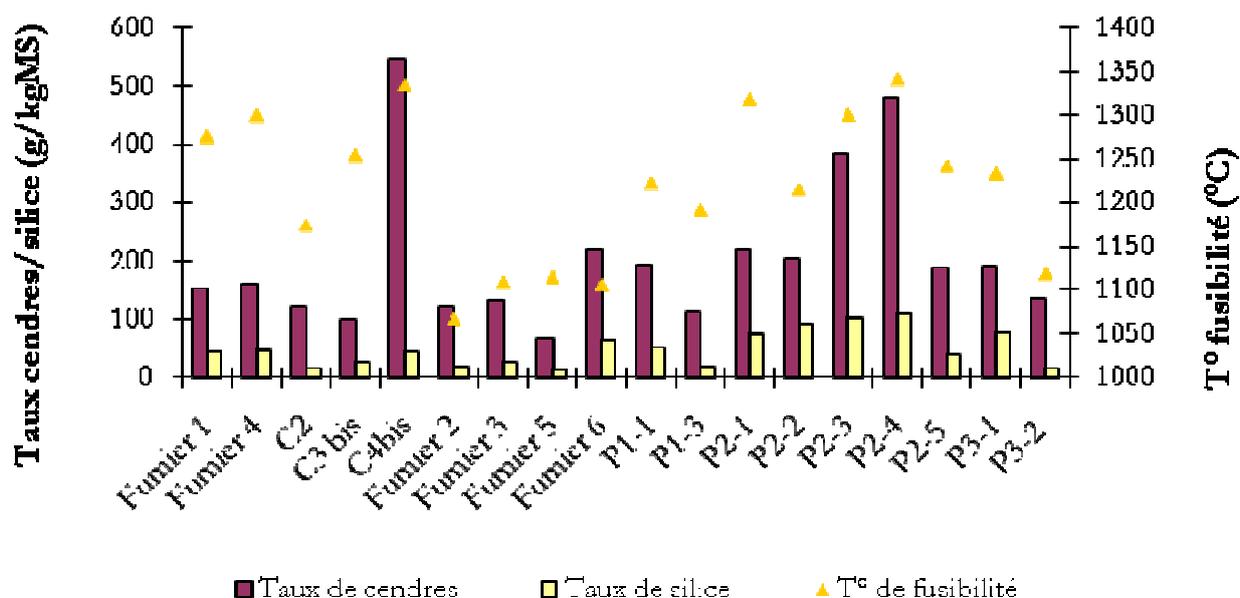
Le taux de silice étant également élevé, il y a un risque accentué de formation de mâchefers et donc la valorisation de ces mâchefers est également à prévoir.

La température de fusibilité est un point important car elle traduit le comportement des cendres au sein du foyer de combustion. Ainsi lorsque la température augmente, les cendres s'agglomèrent en mâchefers imperméables à l'air. Ceci peut être la cause de nombreuses difficultés de fonctionnement du foyer (collage des cendres sur les barreaux de grille, sur les parois latérales du foyer, attaque chimique et corrosion du matériel, obstacle à la répartition de l'air de combustion, difficulté d'évacuation des cendres...). Généralement on considère qu'une température de fusibilité supérieure à 1200°C est convenable. Ainsi on constate que 5 fumiers ont des valeurs de température de fusibilité inférieures, de 1066 à 1116°C, et que deux fumiers ont des valeurs légèrement inférieures à 1200°C : 1174 et 1192°C. Ces valeurs sont basses. Un foyer adapté à la combustion de ce genre de produit est à envisager (par exemple foyer refroidi pour limiter la température et limiter les risques de vitrification liés à la silice et à une température de fusibilité basse)

**Tableau 13 : Production de cendres et de mâchefers**

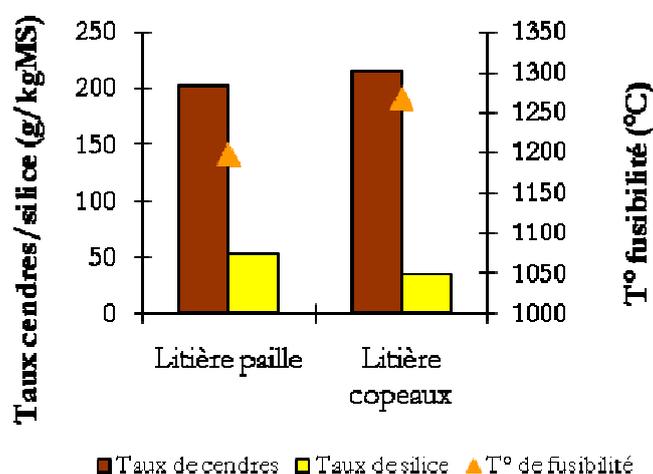
Paramètres		moyenne	mini	maxi	médiane
Taux de cendres	g/kg de MS	206	66	546	174
Taux de silice	g/kg de MS	48	13	109	42,5
T° de fusibilité	°C	1217	1066	1341	1227

Figure 28 : Production de cendres et de mâchefers



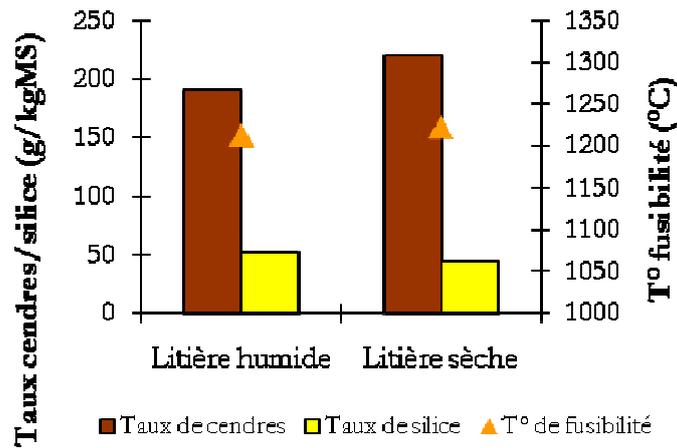
Le taux de cendre est légèrement plus élevé pour les fumiers à litière copeaux (215g/kg MS pour les litières copeaux et 202g/kg MS pour les litières paille), alors que le taux de silice est plus élevé pour les litières à base de paille (53g/kg MS pour les litières paille et 34g/kg MS pour les litières copeaux). Enfin, la température de fusibilité est plus importante pour les litières copeaux (1268°C pour les litières copeaux contre 1198°C pour les litières paille).

Figure 29 : Taux de cendres, de silice et température de fusibilité selon le type de litière : paille ou copeaux



Par ailleurs, le taux de cendres est plus élevé pour les litières sèches (219g/kg MS pour les litières sèches et 190 g/kg MS pour les litières humides). Les taux de silice et les températures de fusibilité se valent.

Figure 30 : Taux de cendres, de silice et température de fusibilité selon le type de litière : sèche ou humide



### 3.4.3 Emissions fumées

Les émissions des fumées peuvent être appréhendées à partir de l'analyse élémentaire des combustibles.

A titre de comparaison nous pouvons donner les valeurs moyennes pour les combustibles biomasses tels que :

Bois (25% d'humidité) : N (‰ MS) : 0.7 à 4.9 ; Cl (‰ MS) : 0.04 à 0.2 ; S (‰ MS) : 0.04 à 0.5

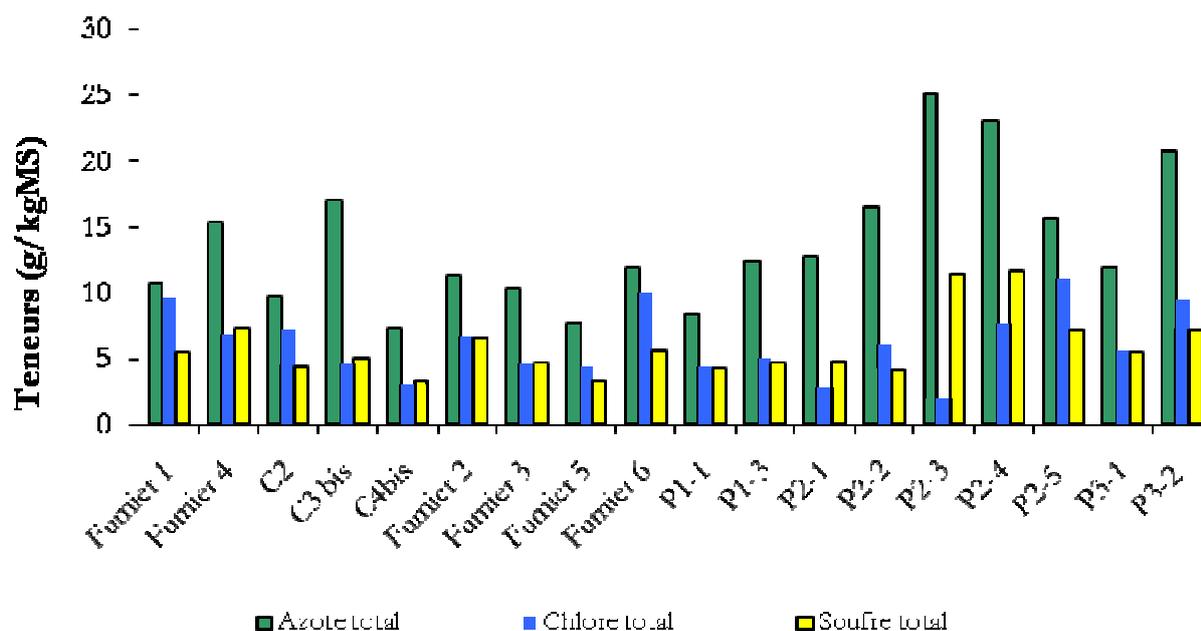
Paille (12% d'humidité) : N (‰ MS) : 1.8 à 8.4 ; Cl (‰ MS) : 1.5 à 7.5 ; S (‰ MS) : 0.5 à 2.7

Les teneurs en chlore, azote et soufre sont élevées, respectivement 6,2 g/kg MS, 13,8 g/kg MS et 5,9 g/kg MS. Ces taux placent la combustion des fumiers équins dans la fourchette haute des biomasses à brûler (bois ou paille). Cette quantité importante de chlore risque de provoquer la corrosion des échangeurs.

**Tableau 14 : Emissions lors de la combustion**

Paramètres			moyenne	mini	maxi	médiane
Azote total	g/kg MS	de	13,8	7,3	25,1	12,15
Chlore total	g/kg MS	de	6,2	2,0	11,0	5,8
Soufre total	g/kg MS	de	5,9	3,3	11,6	5,25

**Figure 31 : Emissions lors de la combustion**



En conclusion, les fumiers peuvent être brûlés mais les inconvénients sont nombreux. Le PCI est faible, il sera donc difficile de brûler ces types de fumiers sans pré-séchage ou mélange avec un coproduit sec et énergétique. Les taux de cendres et de silice sont élevés ce qui implique des aménagements techniques de la chaudière, le traitement des fumées et la valorisation des cendres et des mâchefers. Enfin l'émission de chlore lors de la combustion est importante ce qui augmente le risque de corrosion.

On constate des compositions très variables entre les fumiers analysés. Le fumier n°5 a des caractéristiques plus compatibles avec les exigences de la combustion. Les autres fumiers devront avoir un prétraitement pour au minimum abaisser l'humidité. Le système d'alimentation des chaudières avec ces produits se pose également, des solutions auprès des constructeurs sont à trouver.

La solution de co-combustion dans une chaudière biomasse est certainement une solution plus adaptée mais qui demandera une analyse précise au cas par cas.

## 4 Synthèse et proposition d'une aide à la décision

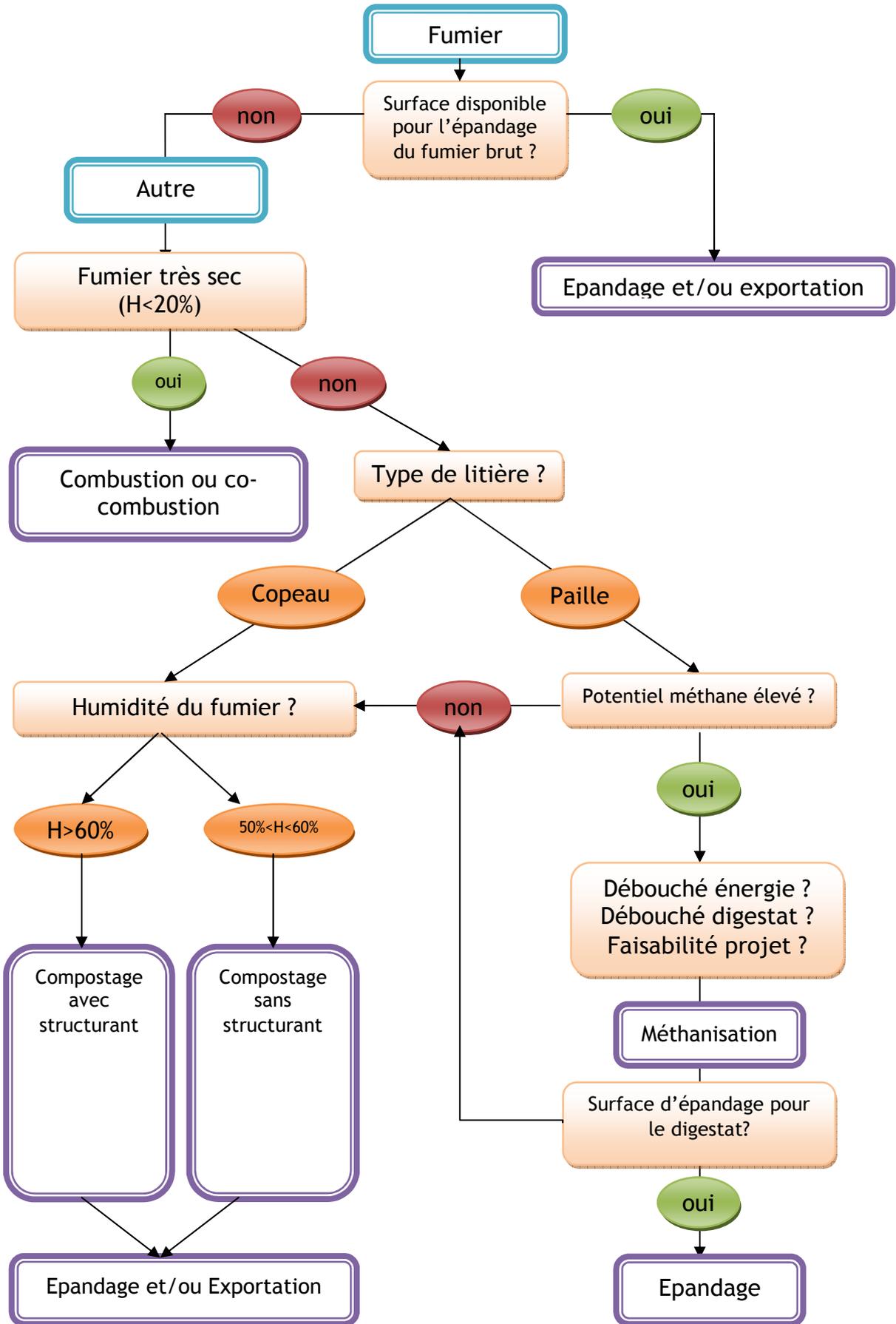
Selon l'humidité et le type de litière, il est possible de suggérer des filières plus pertinentes que d'autres pour la valorisation des fumiers équins. Quelque soit le type de fumier, la valorisation agronomique sous forme d'épandage est toujours possible.

Dans le cas d'un fumier à base de litière paille, la méthanisation peut donner de bons rendements, cependant, l'introduction de ce substrat dans un méthaniseur nécessitera des trémies adaptées et un mélange avec un substrat plus liquide selon la technologie choisie. Selon l'humidité du fumier, le compostage peut être envisagé avec ou sans ajout de structurant. Il ressort de l'étude de compostabilité que si l'humidité est supérieure à 70%, l'espace lacunaire du fumier peut être trop faible pour permettre la circulation de l'oxygène au sein du tas de compost. Aussi, les hauteurs des tas doivent être réduites et l'ajout d'un structurant peut être souhaitable. Si l'humidité est comprise entre 50 et 70%, le compostage pourra se faire sans ajout de structurant, la paille jouant déjà un rôle d'aération. Si l'humidité du fumier est trop faible, le compostage sera difficile. L'ajout de liquide ou le mélange avec un fumier beaucoup plus humide doit être envisagé pour la réalisation du compostage. La combustion de ces fumiers semble très difficile et source de nombreux problèmes (production de cendres importante, corrosion, colmatage, séchage préalable nécessaire...). Cette combustion est possible pour des fumiers très secs comme le fumier n°5, pour les autres fumiers, elle nécessite des aménagements lourds des chaudières. A noter que ce fumier 5 est issu d'un hippodrome. Il est courant que les fumiers issus d'hippodrome soient beaucoup moins souillés que les autres fumiers rencontrés habituellement. Il se peut donc les fumiers issus d'hippodrome soient intéressants pour la combustion. Cependant, le gisement est relativement peu important.

Les fumiers à base de litière copeaux sont plus humides que les fumiers à base de paille, la combustion sera donc d'autant plus compromise. Par ailleurs, les performances de méthanisation de ces fumiers ne sont pas bonnes. Le compostage est possible mais nécessitera un temps de maturation plus long. Par ailleurs, la litière de copeaux ne joue aucun rôle de structuration et d'aération du tas de compost, comme ça peut être le cas de la paille, aussi les besoins d'ajout de structurant seront plus importants.

La figure suivante propose une démarche d'aide à la décision pour le choix des possibilités de valorisation d'un fumier équin. Les orientations sont proposées à partir des caractéristiques physico-chimiques et des résultats des différents tests réalisés au cours de cette étude. Le choix d'une filière de valorisation repose également sur d'autres critères dont la faisabilité technique sur le terrain et l'analyse économique qui détermine le coût de traitement du produit.

Figure 32 : Diagramme d'aide au choix des filières de valorisation des fumiers équins



## 5 Conclusion

Les analyses agronomiques n'ont pas réellement permis de distinguer plusieurs catégories de fumiers. Elles révèlent cependant que la composition de ces fumiers équins est à rapprocher des fumiers bovins en ce qui concerne les caractéristiques agronomiques pour l'épandage. Par ailleurs, il semble que les fumiers à base de litière de copeaux de bois soient plus humides que les fumiers à base de paille.

Par ailleurs, les résultats montrent que la composition en éléments traces métalliques des fumiers ne pose pas de problème et que les teneurs mesurées sont très largement acceptables en comparaison avec les exigences de la norme NFU 44-051. De la même manière les fumiers échantillonnés au cours de la première campagne ne contiennent pas d'éléments pathogènes microbiologiques conformément à la norme NFU 44-051 (salmonelles et œufs d'helminthes viables).

Les tests de compostabilité montrent une variabilité entre les six échantillons, les paramètres techniques de ces fumiers sont généralement favorables au compostage. On montre une différence de comportement entre les fumiers issus de litière de paille et de litière de copeaux. Cependant, certains fumiers présentent un espace lacunaire un peu faible, ce qui peut limiter leur mise en andain (hauteur de l'andain) ou nécessiter l'ajout d'un structurant. Les tests de compostabilité n'ont pas été réalisés lors de la deuxième campagne car une étude est lancée concernant exclusivement le compost de fumier équin.

L'étude de la méthanisation des fumiers équins échantillonnés révèle de grandes disparités des résultats en termes de potentiel méthanogène et de qualité de biogaz. On distingue également deux familles de fumiers selon le type de litière : paille ou copeaux. Il apparaît ainsi que les fumiers « copeaux » ne sont pas intéressants en terme de production de méthane alors que les fumiers « paille » se situent dans des productions proches des fumiers de bovins. Une attention particulière est à porter sur la présence éventuelle d'inhibiteurs tels que des antibiotiques par exemple.

Il apparaît également que la durée de stockage pourrait avoir une influence sur le potentiel méthanogène des fumiers. Plus le temps de stockage est long, plus le potentiel est faible. Ceci s'explique par le fait que lors du stockage, le fumier commence une phase de compostage, voire de fermentation si le tas est trop compact et que l'air ne peut pas suffisamment circuler. Une partie de la matière organique est donc dégradée.

Enfin, les paramètres analytiques sur la combustion des fumiers montrent des valeurs différentes des principaux combustibles utilisés à partir de biomasse. Certains types de fumiers pourraient être « valorisés » en chaudière mais des adaptations spécifiques sur les installations seront nécessaires. Seul un fumier très « propre » et sec issu d'un hippodrome peut être un combustible intéressant.

## 6 Annexes

- Bilan des analyses de fumiers équins
- Fiche technique du test de détermination de l'espace lacunaire et test de compressibilité
- Fiche technique du test de respirométrie
- Fiche technique du test de potentiel méthanogène
- Cinétiques des tests de potentiels méthanogènes

## 6.1 Bilan des analyses de fumiers équins

Nom :	Fumier 1	Fumier 4	C2	C3 bis	C4bis
<b>COMPOSITION DU PRODUIT</b>					
<b>Composition biochimique</b>					
Humidité :	%	62,1	64,7	74,9	70,4
Matière Sèche :	% PB	37,9	35,3	25,2	29,6
Matière Organique :	% MS	86,6	88,6	78,8	86,3
	% PB	32,8	31,3	19,8	25,5
C-organique :	g/kg de MS	433	443	394	431
Matière minérale	g/kg de MS	134	114	212	137
pH :		7,8	8,1	8,15	7,44
Conductivité :	mS.cm <sup>-1</sup>	2,8	3,54	3,76	1,74
Azote global :	g/kg de MS	10,7	9,65	17,08	7,33
Azote organique	g/kg de MS	9,3	6,1	15	6,4
Azote ammoniacal :	g/kg de MS	1,2	3,48	2	0,7
Azote nitrique :	mg/kg de MS	166,000	48,100	83,5	233
Phosphore :	g/kg de MS	8,7	4,9	15,6	4,36
Potassium :	g/kg de MS	18,1	26,6	21,2	7,8
Magnésium :	g/kg de MS	4,1	3,85	5,98	2,66
Calcium :	g/kg de MS	22,7	12,7	23,2	8,42
Sodium	g/kg de MS	3,97	4,7	2,89	2,03
C / N :		40,6	45,9	23	58,8
C / Norg :		46,6	72,3	26,2	67,7

Nom :		Fumier 1	Fumier 4	C2	C3 bis	C4bis
<b>Éléments traces métalliques</b>						
chrome	mg/kg de MS	10	7,8			
cuivre	mg/kg de MS	92	40,6			
nickel	mg/kg de MS	3,7	4,4			
zinc	mg/kg de MS	125	116			
cadmium	mg/kg de MS	Inf à 0.11	Inf à 0.10			
plomb	mg/kg de MS	25,8	Inf à 2.7			
mercure	mg/kg de MS	Inf à 0.10	Inf à 0.10			
sélénium	mg/kg de MS	0,6	0,9			
arsenic	mg/kg de MS	Inf à 0.9	Inf à 0.9			
<b>Critères microbiologiques</b>						
Salmonelles	/25g MB	absence	absence			
Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB	absence	absence			

Nom :		Fumier 1	Fumier 4	C2	C3 bis	C4bis
<b>TEST DE COMPOSTABILITE</b>						
<b>Espace lacunaire</b>						
Masse volumique	g/L	297,0	418,0			
Espace lacunaire sans compression	%	70,0	59,0			
Espace lacunaire pour 3 m de hauteur d'andain	%	42,0	27,0			
Espace lacunaire à compression maximale	%	40,0	25,0			
Hauteur maximum (pour 35%)	m	>3	1,5			
<b>Respirométrie</b>						
Taux de dégradation aérobie à 60 jours :	% MO	20	26			
<b>Aération moyenne journalière</b>						
<i>Jour 0 à jour 4</i>	m3 d'air/tonne PB.j	20	52			
<i>Jour 5 à jour 7</i>	m3 d'air/tonne PB.j	15	37			
<i>Jour 8 à jour 10</i>	m3 d'air/tonne PB.j	12	31			
<i>Jour 11 à jour 30</i>	m3 d'air/tonne PB.j	8	19			
<i>Jour 31 à jour 60</i>	m3 d'air/tonne PB.j	4	6			
<b>TEST DE POTENTIEL METHANOGENE</b>						
<b>Détermination</b>						
Production de biogaz :	Nm3 / to PB Nm3 biogaz / to MO	18,0	18,0			
Potentiel méthanogène :	Nm3 CH4 / to MO	43,0	59,0			
Teneur en CH4 finale :	%	54,0	71,0			
Taux de dégradation anaérobie	% MO	8,0	9,0			

Nom :	Fumier 1	Fumier 4	C2	C3 bis	C4bis
<b>TEST DE COMBUSTION</b>					
<b>Détermination</b>					
Humidité	62,4	73,0	63,7	74,1	65,6
Matière sèche	37,6	27,0	36,3	25,9	34,4
Cendres (à 550°C)	152	160	122	99	546
PCS sur sec	4002	4030	4409	4327	1900
	16756	16873	18460	18116	7955
PCI sur sec	3757	3783	4139	4054	1770
	15730	15839	17329	16973	7411
PCI sur brut	1070	620	1152	642	248
	4480	2596	4823	2688	1038
Chlore total	9,6	6,9	7,2	4,6	3,1
Soufre total	5,52	7,28	4,39	5,02	3,31
Silicium	43	46	14	24	42
Fusibilité des cendres					
T° de contraction	1138	902	901	1052	980
T° de déformation	1184	1240	1144	1148	1247
T° d'hémisphère	1276	1300	1174	1254	1335
T° d'écoulement	>1317	>1307	1202	1319	1461

		Fumier 2	Fumier 3	Fumier 5	Fumier 6	P1-1	P1-3	P2-1
<b>COMPOSITION DU PRODUIT</b>								
<b>Composition biochimique</b>								
Humidité :	%	71,9	56,6	16,8	70,4	57,8	64,5	64,5
Matière Sèche :	% PB	28,1	43,5	83,2	29,6	42,2	35,6	35,5
Matière Organique :	% MS	86,3	75,3	92,8	80,4	70	88,3	82
	% PB	24,3	32,7	77,2	23,8	29,5	31,4	29,1
C-organique :	g/kg de MS	432	377	464	402	350	442	410
Matière minérale	g/kg de MS	137	247	72	196	300	117	180
pH :		7,6	7,2	6,2	7,9	7,81	8,37	7,64
Conductivité :	mS.cm <sup>-1</sup>	3,00	2,60	2,60	4,7	3,21	2,55	2,27
Azote global :	g/kg de MS	11,3	10,4	7,6	11,9	8,4	12,4	12,7
Azote organique	g/kg de MS	11,3	9,4	7,0	9,2	8,3	11,1	12,3
Azote ammoniacal :	g/kg de MS	0,01	1,0	0,55	2,7	0,15	1,33	0,42
Azote nitrique :	mg/kg de MS	3,56	2,3	15,6	3,38	2,37	2,81	2,82
Phosphore :	g/kg de MS	6,8	7,45	2,3	8,7	5,6	7,14	10,5
Potassium :	g/kg de MS	28,6	17,3	16,4	28,9	17,9	19,7	17,2
Magnésium :	g/kg de MS	3,1	3,54	1,44	3,37	3,51	3,45	3,94
Calcium :	g/kg de MS	19,9	14,5	10,4	17,2	14,2	14	15,9
Sodium	g/kg de MS	1,39	1,86	0,85	2,73	1,73	0,97	3,23
C / N :		38,2	36,2	61,0	33,8	41,7	35,6	32,3
C / Norg :		38,3	40,2	65,9	43,7	42,3	39,7	33,4
<b>Éléments traces métalliques</b>								
chrome	mg/kg de MS	22,1	10	3,1	5,8			
cuivre	mg/kg de MS	12,4	22,5	4,3	15,3			
nickel	mg/kg de MS	8,5	4,5	1,5	2,8			
zinc	mg/kg de MS	63,9	120	11,0	47,2			
cadmium	mg/kg de MS	Inf à 0.10	Inf à 0.10	Inf à 0.06	Inf à 0.15			
plomb	mg/kg de MS	Inf à 2.7	Inf à 2.7	Inf à 1.6	Inf à 4.0			
mercure	mg/kg de MS	Inf à 0.10	Inf à 0.10	Inf à 0.06	Inf à 0.1			
sélénium	mg/kg de MS	Inf à 0.4	Inf à 0.4	0,3	0,6			
arsenic	mg/kg de MS	Inf à 0.9	Inf à 0.9	Inf à 0.5	Inf à 1.2			
<b>Critères microbiologiques</b>								
Salmonelles	/25g MB	absence	absence	absence	absence			
Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB	absence	absence	absence	absence			

	Fumier 2	Fumier 3	Fumier 5	Fumier 6	P1-1	P1-3	P2-1
<b>TEST DE COMPOSTABILITE</b>							
<b>Espace lacunaire</b>							
Masse volumique	g/L	58,0	14,0	109,0			
Espace lacunaire sans compression	%	97,0	96,0	88,0			
Espace lacunaire pour 3 m de hauteur d'andain	%	48,0	68,0	28,0			
Espace lacunaire à compression maximale	%	28,0	21,0	22,0			
Hauteur maximum (pour 35%)	m	>3	>3	2,0			
<b>Respirométrie</b>							
Taux de dégradation aérobie à 60 jours :	% MO	46	38	31			
<b>Aération moyenne journalière</b>							
<i>Jour 0 à jour 4</i>	Unité						
	m3 d'air/tonne PB.j	34	20	45			
<i>Jour 5 à jour 7</i>	m3 d'air/tonne PB.j	24	14	32			
<i>Jour 8 à jour 10</i>	m3 d'air/tonne PB.j	20	12	26			
<i>Jour 11 à jour 30</i>	m3 d'air/tonne PB.j	12	7	15			
<i>Jour 31 à jour 60</i>	m3 d'air/tonne PB.j	3	3	4			
<b>TEST DE POTENTIEL METHANOGENE</b>							
<b>Détermination</b>							
Production de biogaz :	Nm3 / to PB	72,0	186,0	50,0	136,0	124,0	
	Nm3 biogaz / to MO	285,0	265,0	207,0	389,0	402,0	
Potentiel méthanogène :	Nm3 CH4 / to MO	190,0	168,0	145,0	219,0	268,0	
Teneur en CH4 finale :	%	67,0	63,0	70,0	56,0	67,0	
Taux de dégradation anaérobie	% MO	31,0	31,0	22,0	48,0	44,0	

TEST DE COMBUSTION								
Détermination								
	Fumier 2	Fumier 3	Fumier 5	Fumier 6	P1-1	P1-3	P2-1	
Humidité	%	73,0	57,2	23,0	72,8	61,6	63,2	72,2
Matière sèche	%	27,0	42,8	77,0	27,2	38,4	36,8	27,8
Cendres (à 550°C)	g/kg de MS	122	131	66	217	193	112	218
PCS sur sec	Kcal/kg de MS	4317	4078	4486	4061	3792	4284	3868
	KJ/kg de MS	18074	17074	18782	17003	15876	17936	16195
PCI sur sec	Kcal/kg de MS	4048	3801	4192	3798	3544	4013	3625
	KJ/kg de MS	16948	15914	17551	15901	14838	16802	15177
PCI sur brut	Kcal/kg de PB	691	1312	3103	633	1022	1129	611
	KJ/kg de PB	2893	5493	12987	2650	4279	4727	2558
Chlore total	g/kg de MS	6,7	4,6	4,4	10	4,4	5	2,8
Soufre total	g/kg de MS	6,6	4,7	3,35	5,63	4,25	4,75	4,76
Silicium	g/kg de MS	18	26	13	63	50	16	74
Fusibilité des cendres	°C							
T° de contraction	°C	864	703	717	687	725	793	693
T° de déformation	°C	1022	923	1021	929	1042	1039	973
T° d'hémisphère	°C	1066	1108	1114	1105	1222	1192	1318
T° d'écoulement	°C	1113	>1229	1150	1145	1338	1205	1373

Nom :	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P3-1	P3-2
<b>COMPOSITION DU PRODUIT</b>						
<b>Composition biochimique</b>						
Humidité :	%	67,5	68,5	68,4	56,2	76,8
Matière Sèche :	% PB	32,5	31,5	31,6	43,8	23,2
Matière Organique :	% MS	58,2	52	70,3	80,2	86,9
	% PB	18,9	16,4	22,2	35,1	20,1
C-organique :	g/kg de MS	291	260	352	401	434
Matière minérale	g/kg de MS	418	480	297	198	131
pH :		7,68	8,57	7,85	7,8	8,06
Conductivité :	mS.cm <sup>-1</sup>	4,10	5,23	4,60	3,11	3,04
Azote global :	g/kg de MS	16,5	23,1	15,7	11,9	20,8
Azote organique	g/kg de MS	16,5	21,3	15,7	11,8	15,6
Azote ammoniacal :	g/kg de MS	0,009	1,8	0,0	0,1	5,18
Azote nitrique :	mg/kg de MS	3,07	3,52	4,43	2,280	4,32
Phosphore :	g/kg de MS	6,43	15,3	7,07	8,3	8,01
Potassium :	g/kg de MS	23,4	46,6	37,1	26,6	34
Magnésium :	g/kg de MS	3,48	7,93	4,68	3,7	2,61
Calcium :	g/kg de MS	10,1	24,8	20	14,9	11,2
Sodium	g/kg de MS	1,12	2,47	3,77	2,3	0,65
C / N :		17,6	11,3	22,4	33,7	20,9
C / Norg :		17,6	12,2	22,4	34,0	27,9
<b>Éléments traces métalliques</b>						
chrome	mg/kg de MS					
cuivre	mg/kg de MS					
nickel	mg/kg de MS					
zinc	mg/kg de MS					
cadmium	mg/kg de MS					
plomb	mg/kg de MS					
mercure	mg/kg de MS					
sélénium	mg/kg de MS					
arsenic	mg/kg de MS					
<b>Critères microbiologiques</b>						
Salmonelles	/25g MB					
Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB					

	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P3-1	P3-2
<b>TEST DE COMPOSTABILITE</b>						
<b>Espace lacunaire</b>						
Masse volumique	g/L					
Espace lacunaire sans compression	%					
Espace lacunaire pour 3 m de hauteur d'andain	%					
Espace lacunaire à compression maximale	%					
Hauteur maximum (pour 35%)	m					
<b>Respirométrie</b>						
Taux de dégradation aérobique à 60 jours :	% MO					
<b>Aération moyenne journalière</b>						
<i>Jour 0 à jour 4</i>	m3 d'air/tonne PB.j					
<i>Jour 5 à jour 7</i>	m3 d'air/tonne PB.j					
<i>Jour 8 à jour 10</i>	m3 d'air/tonne PB.j					
<i>Jour 11 à jour 30</i>	m3 d'air/tonne PB.j					
<i>Jour 31 à jour 60</i>	m3 d'air/tonne PB.j					
<b>TEST DE POTENTIEL METHANOGENE</b>						
<b>Détermination</b>						
Production de biogaz :	Nm3 / to PB	6,0	24,0		56,0	119,0
	Nm3 biogaz / to MO	46,0	125,0		263,0	464,0
Potentiel méthanogène :	Nm3 CH4 / to MO	25,0	90,0		156,0	275,0
Teneur en CH4 finale :	%	53,0	72,0		59,0	59,0
Taux de dégradation anaérobie	% MO	6,0	13,0		32,0	56,0

<b>TEST DE COMBUSTION</b>							
<b>Détermination</b>							
		<b>P2-2</b>	<b>P2-3</b>	<b>P2-4</b>	<b>P2-5</b>	<b>P3-1</b>	<b>P3-2</b>
Humidité	%	57,1	78,7	66,2	39,4	75,8	70,0
Matière sèche	%	42,9	21,3	33,8	60,6	24,2	30,0
Cendres (à 550°C)	g/kg de MS	202	382	479	188	191	135
PCS sur sec	Kcal/kg de MS	3907	3182	2694	3869	3885	3994
	KJ/kg de MS	16358	13322	11279	16199	16266	16722
PCI sur sec	Kcal/kg de MS	3656	2996	2524	3630	3638	3737
	KJ/kg de MS	15307	12544	10567	15198	15232	15646
PCI sur brut	Kcal/kg de PB	1254	205	489	1983	463	736
	KJ/kg de PB	5250	858	2047	8302	1938	3081
Chlore total	g/kg de MS	6	2	7,6	11	5,6	9,4
Soufre total	g/kg de MS	4,16	11,4	11,6	7,16	5,48	7,17
Silicium	g/kg de MS	90	102	109	37	75	15
Fusibilité des cendres	°C						
T° de contraction	°C	784	732	901	783	684	949
T° de déformation	°C	1080	1080	1269	1137	914	1076
T° d'hémisphère	°C	1215	1301	1341	1242	1233	1118
T° d'écoulement	°C	1285	1361	1394	1298	1271	1150

Nom :	Moyenne	Mini	Maxi	Médiane
<b>COMPOSITION DU PRODUIT</b>				
<b>Composition biochimique</b>				
Humidité :	%	16,8	82,3	67,95
Matière Sèche :	% PB	17,7	83,2	32,05
Matière Organique :	% MS	52,0	92,8	80,3
	% PB	11,0	77,2	24,9
C-organique :	g/kg de MS	260,0	464,0	401,5
Matière minérale	g/kg de MS	72,0	480,0	197
pH :		6,2	8,6	7,81
Conductivité :	mS.cm <sup>-1</sup>	1,7	5,2	3,075
Azote global :	g/kg de MS	7,3	25,1	12,15
Azote organique	g/kg de MS	6,1	25,0	11,55
Azote ammoniacal :	g/kg de MS	0,0	5,2	0,7
Azote nitrique :	mg/kg de MS	37,3	233,0	3,940
Phosphore :	g/kg de MS	2,3	19,3	7,730
Potassium :	g/kg de MS	24,1	46,6	22,300
Magnésium :	g/kg de MS	4,1	8,5	3,640
Calcium :	g/kg de MS	16,8	29,1	15,400
Sodium	g/kg de MS	2,3	4,7	2,140
C / N :		32,8	61,0	33,750
C / Norg :		37,5	72,3	36,150
<b>Éléments traces métalliques</b>				
chrome	mg/kg de MS	9,8	22,1	8,9
cuivre	mg/kg de MS	31,2	92,0	18,9
nickel	mg/kg de MS	4,2	8,5	4,05
zinc	mg/kg de MS	80,5	125,0	89,95
cadmium	mg/kg de MS	-	-	-
plomb	mg/kg de MS	-	-	-
mercure	mg/kg de MS	-	-	-
sélénium	mg/kg de MS	-	-	-
arsenic	mg/kg de MS	-	-	-
<b>Critères microbiologiques</b>				
Salmonelles	/25g MB	-	-	-

Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB	-	-	-
<b>TEST DE COMPOSTABILITE</b>				
<b>Espace lacunaire</b>				
Masse volumique	g/L	171,2	14,0	418,0
Espace lacunaire sans compression	%	83,3	59,0	97,0
Espace lacunaire pour 3 m de hauteur d'andain	%	40,5	27,0	68,0
Espace lacunaire à compression maximale	%	27,0	21,0	40,0
Hauteur maximum (pour 35%)	m	1,8	1,5	2,0
<b>Respirométrie</b>				
Taux de dégradation aérobie à 60 jours :	% MO	32,2	20,0	46,0
<b>Aération moyenne journalière</b>				
<i>Jour 0 à jour 4</i>	m3 d'air/tonne PB.j	33,5	20,0	52,0
<i>Jour 5 à jour 7</i>	m3 d'air/tonne PB.j	23,7	14,0	37,0
<i>Jour 8 à jour 10</i>	m3 d'air/tonne PB.j	19,5	12,0	31,0
<i>Jour 11 à jour 30</i>	m3 d'air/tonne PB.j	11,7	7,0	19,0
<i>Jour 31 à jour 60</i>	m3 d'air/tonne PB.j	3,7	2,0	6,0
<b>TEST DE POTENTIEL METHANOGENE</b>				
<b>Détermination</b>				
Production de biogaz :	Nm3 / to PB Nm3 biogaz / to MO	74,8 235,1	6,0 46,0	186,0 464,0
Potentiel méthanogène :	Nm3 CH4 / to MO	148,8	25,0	275,0
Teneur en CH4 finale :	%	62,8	53,0	72,0
Taux de dégradation anaérobie	% MO	27,3	6,0	56,0
				29,5

<b>TEST DE COMBUSTION</b>		<b>Moyenne</b>	<b>Mini</b>	<b>Maxi</b>	<b>Médiane</b>
<b>Détermination</b>					
Humidité	%	63,8	23,0	78,7	65,9
Matière sèche	%	36,2	21,3	77,0	34,1
Cendres (à 550 °C)	g/kg de MS	206,4	66,0	546,0	174
PCS sur sec	Kcal/kg de MS	3838,1	1900,0	4486,0	3998
	KJ/kg de MS	16069,2	7955,0	18782,0	16739
PCI sur sec	Kcal/kg de MS	3594,7	1770,0	4192,0	3747
	KJ/kg de MS	15050,4	7411,0	17551,0	15688
PCI sur brut	Kcal/kg de PB	964,6	205,0	3103,0	713,5
	KJ/kg de PB	4038,2	858,0	12987,0	2987
Chlore total	g/kg de MS	6,2	2,0	11,0	5,8
Soufre total	g/kg de MS	5,9	3,3	11,6	5,25
Silicium	g/kg de MS	47,6	13,0	109,0	42,5
Fusibilité des cendres	°C				
T° de contraction	°C	832,7	684,0	1138,0	788,5
T° de déformation	°C	1081,6	914,0	1269,0	1078
T° d'hémisphère	°C	1217,4	1066,0	1341,0	1227,5
T° d'écoulement	°C	1271,0	1113,0	1461,0	1285

## 6.2 Fiche technique du test de compressibilité et espace lacunaire

### Objectif :

La structure d'un substrat à composter est, habituellement, évaluée qualitativement afin d'appréhender son comportement lors du compostage. Afin de décrire plus fidèlement le comportement de tassement d'un tas de compost, les équations de compressibilité des sols issues des études de pédologie ont pu être transposées avec succès.

L'évaluation de la structure du substrat se compose de deux manipulations indépendantes :

- La détermination expérimentale de l'espace lacunaire d'un produit non compressé,
- La réalisation d'un test de compression afin de modéliser son tassement.

Ce test permet de connaître l'espace lacunaire du compost en fonction de la hauteur de l'andain.

### Principe :

L'espace lacunaire représente l'espace libre entre les particules occupé par l'air ou par l'eau.

Dans l'évaluation d'un volume de produit, l'espace libre entre les particules est occupé par de l'air et/ou par de l'eau. La porosité du produit représente l'espace libre entre les particules, occupé par de l'air.

Pour cela, la masse d'eau qui est déplacée par une masse sèche connue d'échantillon est mesurée. Le volume d'eau déplacé correspond de fait avec celui des particules d'échantillon étudié.

Un test de compression permet d'évaluer la résistance du produit à la compression, simulant ainsi une hauteur d'andain. Pour cela, un volume connu (>10L) de fumier est placé dans une cellule de compression. Des échelons de poids de 2 kg sont appliqués successivement au compost et la variation de volume est mesurée. Il faut attendre 24 heures avant de faire la mesure et de passer à l'échelon de poids suivant.

Ceci permet de calculer l'évolution de l'espace lacunaire correspondant à chaque échelon de poids, représentatif d'une pression appliquée au produit.

L'essai est conduit à 4°C afin de limiter l'évolution biologique du produit.

Plusieurs essais sont réalisés pour chaque échantillon de biomasse. Moyenne et écart type sont établis. L'essai est conduit pendant 10 jours.

## 6.3 Fiche technique du test de respirométrie



### Objectifs :

Le test de respirométrie permet d'évaluer le niveau de biodégradabilité aérobie d'un produit ou d'un mélange, de déterminer les besoins en oxygène, notamment au début de la dégradation (étapes limitantes), de calculer la puissance d'aération (dans le cas d'une aération forcée).

### Principe :

Le produit à tester est introduit dans des réacteurs batchs en conditions non limitantes d'oxygénation afin que les conditions favorables au compostage se développent. L'air introduit est saturé en eau afin d'éviter l'assèchement du produit et le réacteur est placé dans une enceinte thermostatée à 55°C afin de recréer les conditions optimales d'un andain de compostage. En effet, dans un compostage en andain, l'activité microbienne fait monter le tas en température. Avec des volumes plus petits, la quantité de matière ne permet pas de garder la chaleur produite et ne permet pas cette montée en température nécessaire au compostage. Chauffer l'enceinte contenant les batchs permet de recréer les conditions d'un compostage classique.

Le niveau de biodégradabilité aérobie du produit est évalué chaque jour par une analyse en sortie réacteur du taux de CO<sub>2</sub> dégagé. On peut ainsi calculer les quantités d'O<sub>2</sub> consommées au cours du compostage.

Plusieurs essais sont réalisés pour chaque échantillon de biomasse. Moyenne et écart type sont établis. L'essai est conduit pendant 2 mois

## 6.4 Fiche technique du test de potentiel méthanogène

### Objectif et domaine d'application :

Le test de potentiel méthanogène permet de déterminer la production maximale de biogaz d'un échantillon de biomasse. On mesure la vitesse de production de biogaz (cinétique de fermentation) et la composition en méthane (CH<sub>4</sub>) et dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ce test peut être réalisé sur différents échantillons de biomasse : effluents d'élevages (lisiers, fientes, fumiers...), déchets agroalimentaires (résidus ligno-cellulosiques, graisses, boues ...), déchets de collectivités (biodéchets, boues de STEP...), cultures énergétiques (plante entière, ensilage, foin...) ainsi que tout autre résidu ou sous-produit organique.

### Principe général :

Les tests sont réalisés dans des réacteurs anaérobies d'une capacité minimale de 1 litre avec un inoculum anaérobie adapté\*. Fermés hermétiquement, les fermenteurs sont maintenus à 39°C dans un bain thermostaté et agités régulièrement (ou 55°C si flore thermophile). Chaque réacteur est muni d'un système d'enregistrement permettant la mesure du volume de biogaz produit au cours du temps ainsi que l'analyse de sa composition en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>.



*\* Le fait de travailler sur des volumes de réacteurs importants permet de valider la biodégradabilité anaérobie de l'échantillon. Nous pouvons ainsi travailler sur une granulométrie représentative du déchet en fonctionnement industriel. De même le choix d'un inoculum adapté consolide la représentativité de la mesure effectuée.*

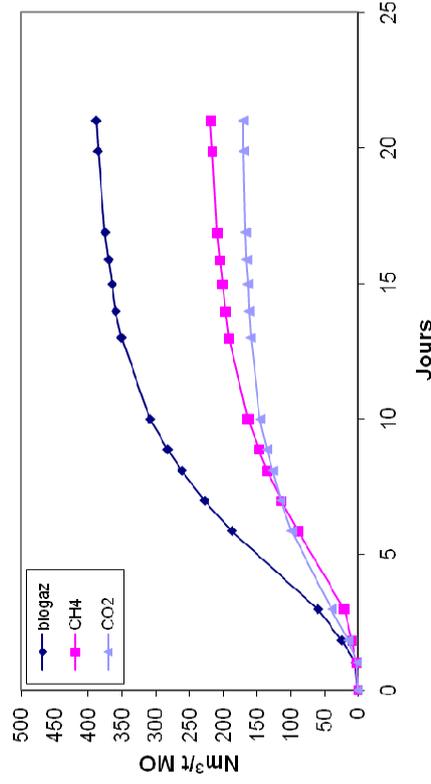
Référence normative : il n'existe pas une norme relative au test de potentiel méthanogène. La méthode mise au point s'appuie sur les références issues de la littérature scientifique et sur plus de 15 années de pratiques.

### Informations pratiques :

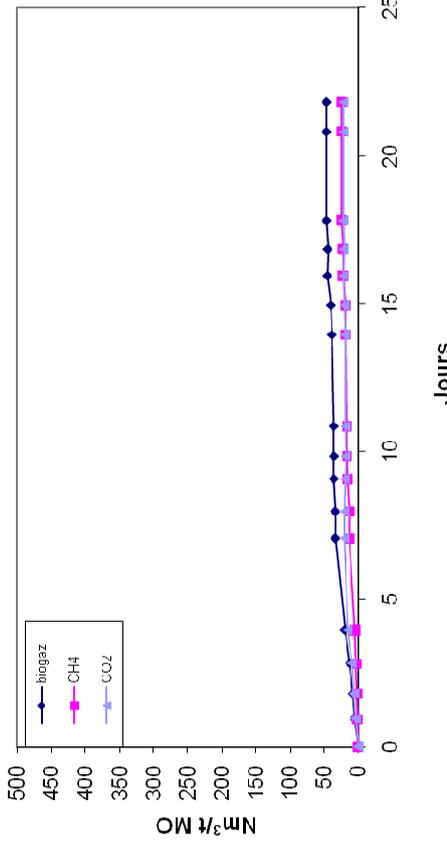
Pour s'assurer d'un bon déroulement de la méthanisation, on utilise un inoculum anaérobie adapté. L'essai de fermentation se poursuit jusqu'à l'arrêt de la production de biogaz. Plusieurs essais sont réalisés pour chaque échantillon de biomasse. Moyenne et écart type sont établis. Les résultats sont donnés en volume de biogaz par unité de masse de produit exprimé par rapport au produit brut, à la matière sèche et à la matière organique. Les volumes de biogaz sont ramenés aux conditions normales de température et de pression et exprimés en normo-litre. La composition est donnée en pourcent de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub>. Le degré de biodégradation anaérobie (en % de la matière organique initiale) est calculé. La courbe de production est fournie ainsi qu'un positionnement du produit en termes de production de biogaz par rapport à une gamme d'échantillons de biomasse.

## 6.5 Cinétique des tests de potentiel méthanogènes

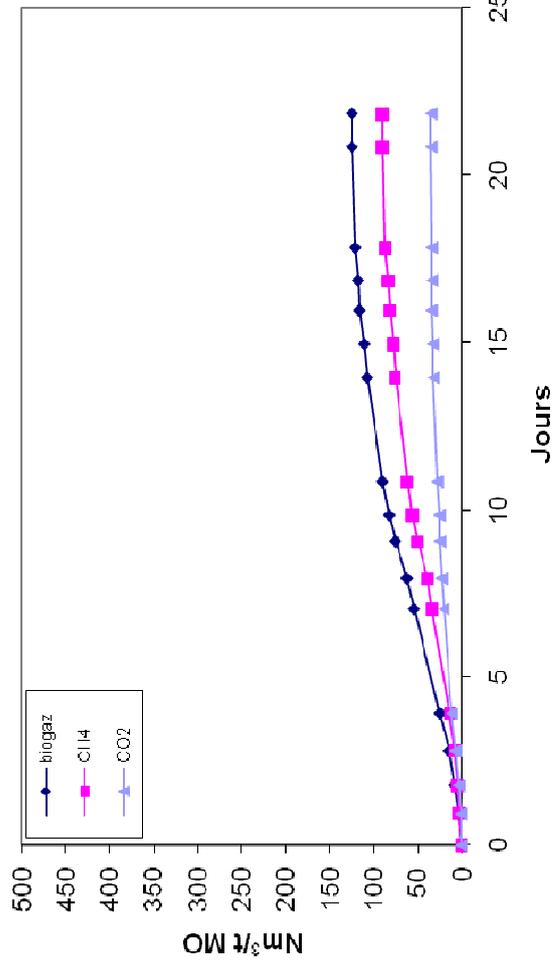
P1-1



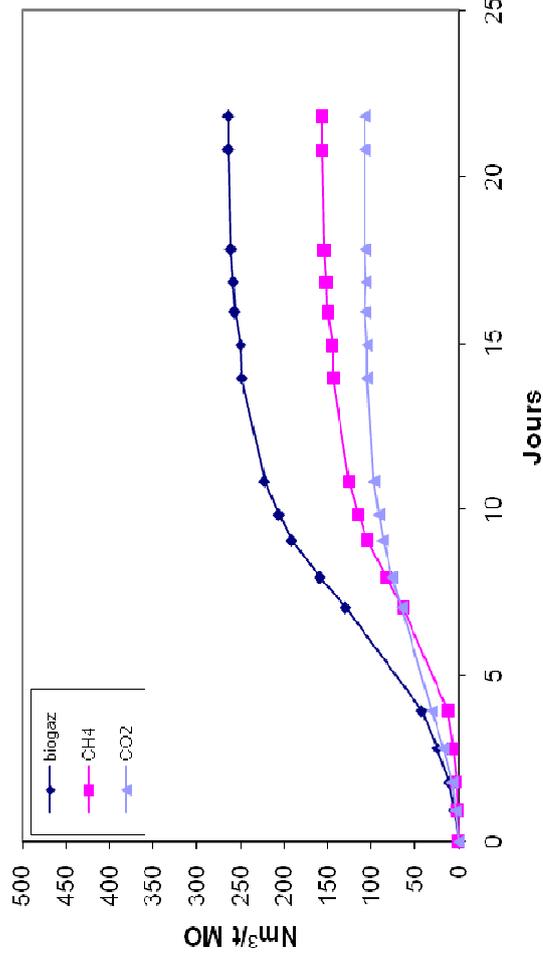
P2-3



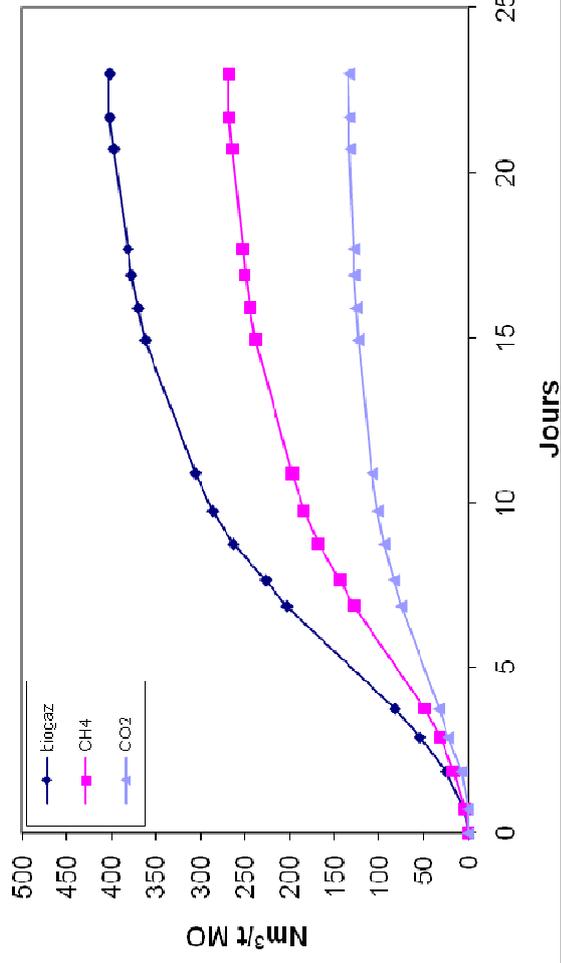
P2-4



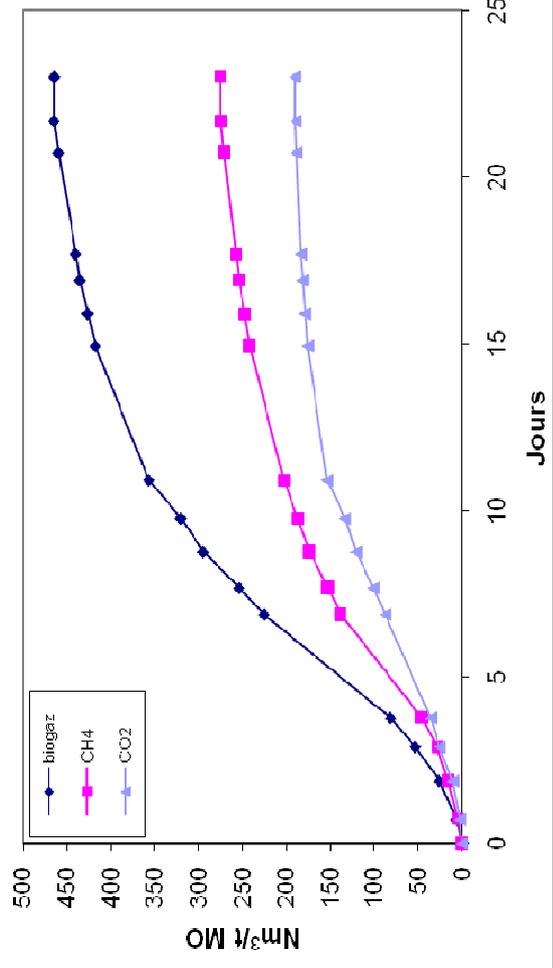
P3-1



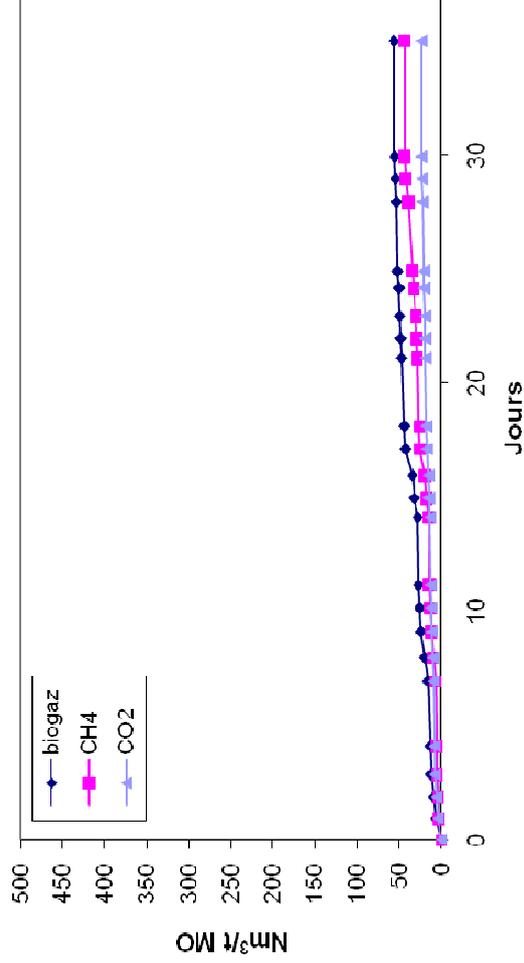
P1-3



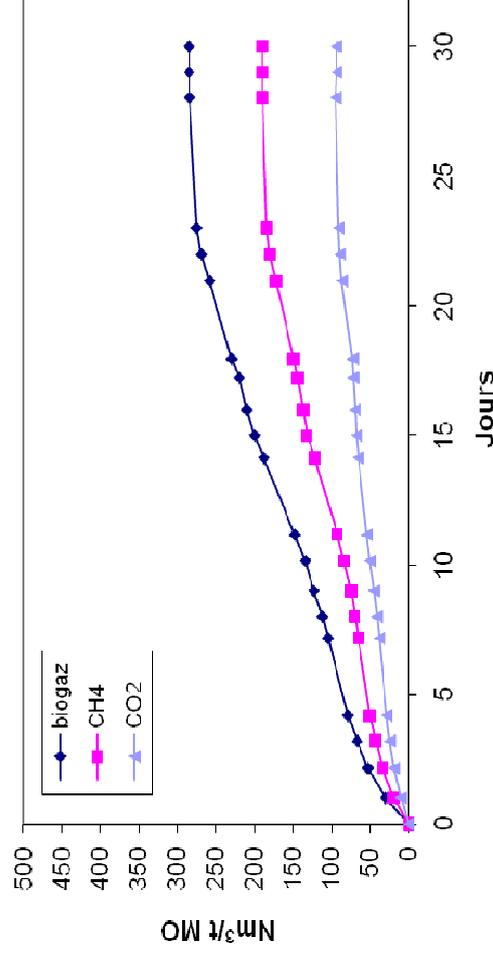
P3-2



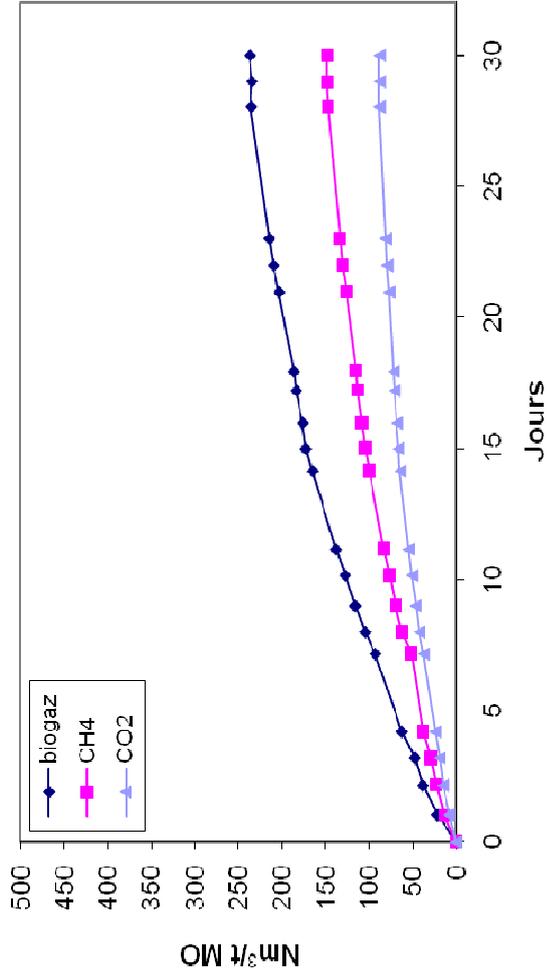
Fumier n°1



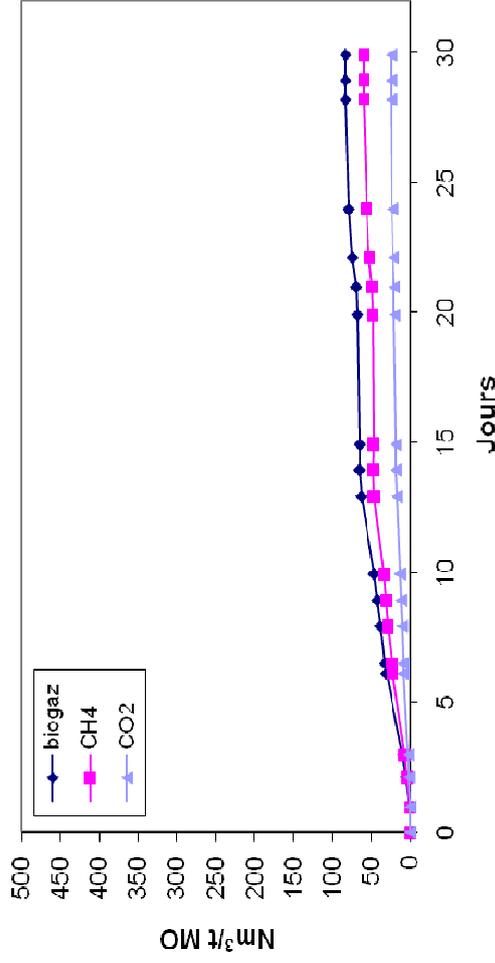
Fumier n°2



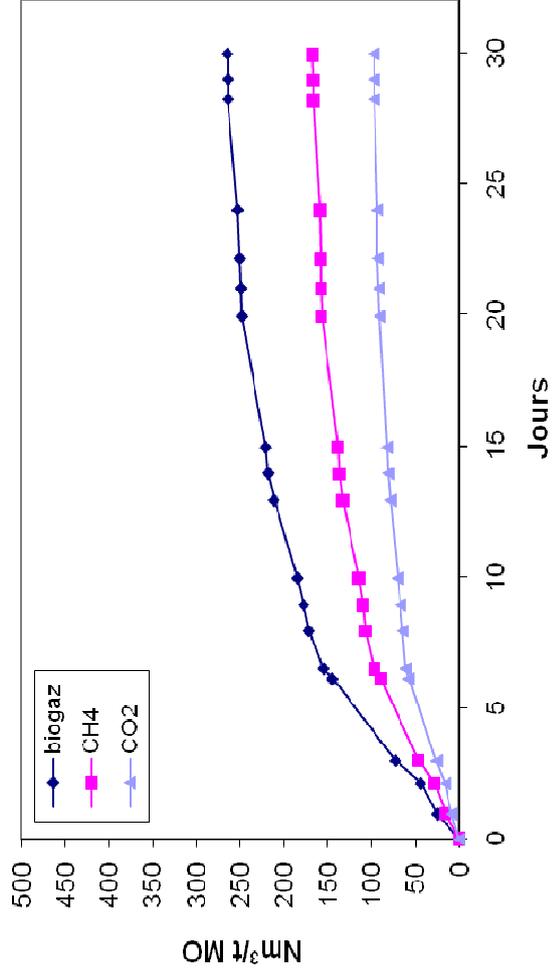
Fumier n°3



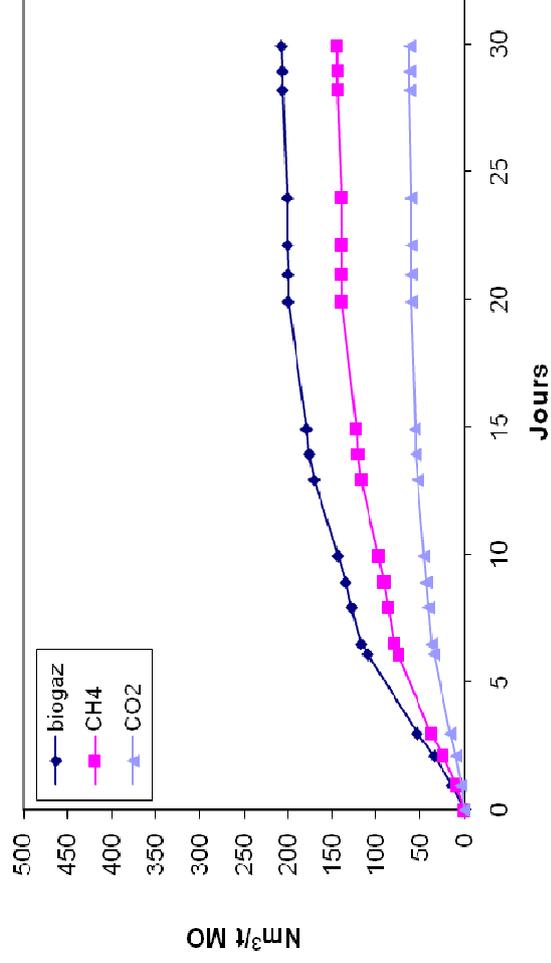
Fumier 4



Fumier 5



Fumier 6



## 6.6 Caractéristiques biocombustibles

A titre d'information pour permettre une meilleure compréhension des analyses des paramètres biocombustibles des fumiers, le tableau suivant présente les caractéristiques du bois et de la paille de céréales.

Paramètres	Bois	Paille de céréales
PCI sur brut (kcal/tPB)	3000 (à 25%MS)	3504 (à 12%MS)
PCI sur sec (kcal/tMS)	4320	4080
Taux d'humidité (%/pb)	20 à 25	8 à 12
Taux de cendre (g/kgMS)	5 à 15	30 à 62
Fusibilité (t° de fusion)	1000 à 1400	800 à 1273
Taux de silice (g/kgMS)	-	0.5 à 20
Azote total (g/kgMS)	0.7 à 4.9	1.8 à 8.4
Soufre total (g/kgMS)	0.04 à 0.5	0.5 à 2.7
Chlore total (g/kgMS)	0.04 à 0.2	1.4 à 7.5