



ARVALIS
Institut du végétal



OPÉRATION PILOTE

« MISCANTHUS »:

DE LA RECOLTE A LA COMBUSTION

RAPPORT ETABLI PAR :

- › Marie Bodenez, Céline Laboubée (GIE ARVALIS/ONIDOL), Afsaneh Lellahi (Arvalis Institut du végétal), dans le cadre du programme REGIX.
- › Nicolas Trillaud (Chambre d'Agriculture de Lot-et-Garonne), dans le cadre du programme SOLEA, avec la participation financière du CasDAR (MAP), et grâce au financement du Syndicat Mixte pour l'Aménagement du Pays d'Albret - Porte de Gascogne pour la réalisation de l'Opération Pilote « *Miscanthus* ».

SOMMAIRE

I.	CONTEXTE DE L'ETUDE	6
II.	CARACTERISATION DE LA PARCELLE ET DONNEES METEOROLOGIQUES.....	7
II. A.	PEUPLEMENT	7
II. B.	NORMALES CLIMATIQUES	8
II. C.	BILAN CLIMATIQUE DE L'ANNEE.....	8
II. C - 1)	<i>Températures</i>	8
II. C - 2)	<i>Précipitations</i>	9
II. C - 3)	<i>Synthèse</i>	9
III.	CHANTIER DE RECOLTE ENSILAGE ET MESURES.....	11
III. A.	MATERIEL DE RECOLTE.....	11
III. B.	DEROULEMENT DE LA RECOLTE	13
III. C.	DEBIT DE CHANTIER.....	14
III. D.	RENDEMENTS OBSERVES.....	14
III. E.	MASSE VOLUMIQUE	15
III. F.	STOCKAGE EN BOUT DE CHAMP DU MISCANTHUS	16
IV.	ESSAI COMBUSTION MISCANTHUS.....	17
IV. A.	LA CHAUDIERE PILOTE	17
IV. A - 1)	<i>Caractéristiques de la chaudière pilote</i>	17
IV. A - 2)	<i>Alimentation de la chaudière</i>	18
IV. A - 3)	<i>Fonctionnement de la chaudière</i>	19
IV. A - 4)	<i>Traitement des fumées</i>	20
IV. A - 5)	<i>Régulation de la chaudière</i>	20
IV. B.	DEROULEMENT DE L'ESSAI	21
IV. B - 1)	<i>Premier jour d'essai (16/04/2007) : nettoyage préalable</i>	21
IV. B - 2)	<i>Deuxième jour d'essai (17/04/2007) : fin du nettoyage, mise en route de la chaudière, stabilisation du fonctionnement.</i> 21	
IV. B - 3)	<i>Troisième jour d'essai (18/04/2007) : contrôle des rejets atmosphériques</i>	22
IV. B - 4)	<i>Quatrième jour d'essai (19/04/2007) : évaluation de l'état de la chaudière à l'arrêt</i>	22
IV. B - 5)	<i>Cinquième jour d'essai (20/04/2007) : arrêt définitif de la chaudière, derniers relevés et évaluations</i> 23	
IV. C.	PRELEVEMENTS EFFECTUES AU COURS DE LA COMBUSTION	23
IV. C - 1)	<i>Prélèvement du Miscanthus en entrée de chaudière</i>	23
IV. C - 2)	<i>Prélèvement des cendres issues de la combustion</i>	23
IV. C - 3)	<i>Analyse des fumées</i>	24
V.	RESULTATS DE L'ESSAI COMBUSTION MISCANTHUS.....	26
V. A.	SUIVI DE LA MANUTENTION	26
V. B.	SUIVI DE LA COMBUSTION.....	26
V. B - 1)	<i>Déroulement de la combustion</i>	26
V. B - 2)	<i>Analyse visuelle du foyer lors de l'arrêt de la chaudière</i>	26
V. B - 3)	<i>Analyse visuelle des tubes de fumées lors de l'arrêt de la chaudière</i>	26
V. B - 4)	<i>Analyse de la puissance développée par la chaudière pendant la combustion</i>	27

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

V. C.	ANALYSE DE LA MATIERE PREMIERE COMBUSTIBLE	27
V. C - 1)	<i>Analyse élémentaire</i>	27
V. C - 2)	<i>Analyse du pouvoir calorifique</i>	29
V. D.	ANALYSE DES FUMÉES	30
V. D - 1)	<i>Estimation de la masse des poussières</i>	30
V. D - 2)	<i>Analyse gazeuse des prélèvements</i>	30
V. D - 3)	<i>Analyse gazeuse tout au long de l'essai</i>	32
V. E.	ANALYSE DES CENDRES DE COMBUSTION DU MISCANTHUS.....	35
V. E - 1)	<i>Analyse générale</i>	35
V. E - 2)	<i>Cas du soufre et de l'azote</i>	36
VI.	ELEMENTS DE DISCUSSION.....	37
VI. A.	INFLUENCE DE LA CONDUITE DE LA CULTURE SUR LE PEUPLEMENT DE LA PARCELLE DE MISCANTHUS	37
VI. A - 1)	<i>Implantation</i>	37
VI. A - 2)	<i>L'arrachage de rhizomes</i>	37
VI. B.	RECOLTE DU MISCANTHUS	37
VI. B - 1)	<i>Date de récolte du Miscanthus</i>	37
VI. B - 2)	<i>Technique de récolte</i>	37
VI. B - 3)	<i>Estimation du rendement</i>	38
VI. B - 4)	<i>Estimation de la masse volumique</i>	38
VI. C.	RENDEMENT FINAL DU MISCANTHUS.....	38
VI. D.	COMBUSTION DU MISCANTHUS	39
VI. D - 1)	<i>Puissance thermique développée pendant la combustion</i>	39
VI. D - 2)	<i>Emissions de gaz</i>	39
VII.	CONCLUSION.....	40
ANNEXES	42

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Moyennes climatiques mensuelles sur la période 1975 – 2006 (ClimBox, station météorologique de Tonneins – Fauillet – 47)	8
Graphique 2 : Températures moyennes mensuelles en 2006 par rapport à la normale (ClimBox, station météorologique de Tonneins Tonneins – Fauillet – 47).....	8
Graphique 3 : Précipitations moyennes mensuelles en 2006 par rapport à la normale (ClimBox, station météorologique de Tonneins Tonneins – Fauillet – 47).....	9
Graphique 4 : Précipitation et températures journalières, Somme de températures du 01/2006 et 12/2006 (ClimBox, station météorologique de Tonneins Tonneins – Fauillet – 47).....	9
Graphique 5: Comparaison de la composition chimique du <i>Miscanthus</i> avec d'autres biocombustibles (Source Blé et Triticale : Arvalis - Institut du Végétal).....	29
Graphique 6: Concentration des émissions en éléments polluants au cours de la combustion du <i>Miscanthus</i> (Source : BUREAU VERITAS).....	31
Graphique 7: Comparaison des émissions moyennes en divers polluants sur <i>Miscanthus</i> et Bois (Source bois: Allemand N.; CIPETA, Mars 2003, convention ADEME n°01 01 080)	32
Graphique 8: Analyse gazeuse des fumées du 18/04/2007 (Source : BUREAU VERITAS).....	33
Graphique 9: Analyse des cendres issues de la combustion (Source : Laboratoire d'analyses et de contrôles INZO)	35
Graphique 10 : Concentration en Soufre dans la matière première, et les cendres.....	36
Graphique 11 : Concentration en Azote dans la matière première, et les cendres.....	36

TABLE DES PHOTOS

Photo 1: Vue de l'observation de la présence de pyrale sur le <i>Miscanthus</i> (Source : Arvalis).....	7
Photo 2: Vue sur les dégâts causés par la présence de pyrale sur le <i>Miscanthus</i> (Source : Arvalis)...	7
Photo 3 : Vue sur le bec Kemper de l'ensileuse (Source : Pôle énergie CA 47)	13
Photo 4 : Vue de l'ensileuse et du tracteur Massey Ferguson (Source : Pôle énergie CA 47).....	13
Photo 5: Vue de l'ensileuse, du tracteur New Holland et des ornières sur la parcelle (Source : Pôle énergie CA 47)	14
Photo 6 : Vue de la pesée du matériel de récolte (Source : Pôle énergie CA 47).....	15
Photo 7 : Vue du stockage du <i>Miscanthus</i> ensilé en bout de parcelle (Source : Pôle énergie CA 47)	16
Photo 8 : Vue du chargement du <i>Miscanthus</i> dans les camions (Source : Pôle énergie CA 47).....	16
Photo 9 : Vue des échelles racleuses recouvertes par du <i>Miscanthus</i> ensilé (Source : Pôle énergie CA 47).....	18
Photo 10 : Vue du convoyeur (Source : Pôle énergie CA 47)	19
Photo 11 : Vue du foyer et des grilles mobiles avec dans le fond du <i>Miscanthus</i> (Source : Pôle énergie CA 47).....	19
Photo 12 : Vue du tableau écran de gestion de la chaudière fournissant les informations sur son fonctionnement (Source : Pôle énergie CA 47)	21
Photo 13 : Vue du foyer en fonctionnement (Source : Pôle énergie CA 47).....	22
Photo 14: Vue du système d'analyse des fumées (Source : Pôle énergie CA 47).....	24
Photo 15: Vue sur le prélèvement des échantillons (Source: Pôle énergie CA 47).....	28

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques techniques du matériel de récolte du <i>Miscanthus</i>	12
Tableau 2 : Débit de chantier de l'opération d'ensilage du <i>Miscanthus</i>	14
Tableau 3 : Evaluation du rendement du <i>Miscanthus</i>	14
Tableau 4 : Evaluation de la masse volumique du <i>Miscanthus</i>	15
Tableau 5 : Puissance délivrée par la chaudière en fonction de l'humidité du combustible (Source : COMPTE-R).....	18
Tableau 6: Liste des éléments analysés sur les cendres du foyer (Source : Laboratoire d'analyses et de contrôles INZO).....	24
Tableau 7: puissance thermique délivrée par la chaudière en fonction des périodes de relevés du 18/04 (Source: COMPTE-R).....	27
Tableau 8: Analyse du <i>Miscanthus</i> en entrée chaudière (Source : Laboratoire d'analyses et de contrôles INZO).....	28
Tableau 9: Rapport d'analyse du PCS (Source : ARVALIS – Institut du Végétal).....	29
Tableau 10: Concentration en éléments sur un panel de chaudières industrielles et de chauffage collectif au bois.....	32
Tableau 11: Comparaison de la teneur en éléments lourds du <i>Miscanthus</i> de l'essai avec la bibliographie (Source : SCHMIDT A. et al., 1993).....	36

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Vue en coupe d'une chaudière de la série DH COMPACT (Source : Pôle énergie CA 47).....	17
---	----

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Miscanthus Giganteus communément appelé « Herbe à Eléphants » est une graminée à rhizomes originaire d'Asie. Le *Miscanthus* bénéficie d'une attention accrue en raison de ses qualités annoncées : haut potentiel à biomasse, résistance aux agents pathogènes, exigence moindre en intrants et caractère pluriannuel. Il existe actuellement peu de références à son sujet dans le contexte français. C'est pourquoi, cette culture doit faire l'objet d'expérimentations pour encourager son développement.

En 2001, les exploitants de la SCEA de Comets, située à Villefranche du Queyran (47), ont implanté du *Miscanthus* sur une parcelle de 10 ha en partenariat avec la société Bical. Leur but était de tester la faisabilité de cette culture et de produire des rhizomes pour la société Bical. Fin 2006, ayant pris connaissance des actions menées par la Chambre d'Agriculture de Lot-et-Garonne sur la valorisation de la biomasse, les agriculteurs ont souhaité valoriser la partie aérienne jusqu'alors inexploitée

Une opération pilote a donc été élaborée sur cette culture à biomasse en 2007, dans le cadre d'un partenariat entre le GIE ARVALIS/ONIDOL et la Chambre d'Agriculture de Lot-et-Garonne.

Plus particulièrement, cette opération pilote a été menée sur cette culture, dans le cadre d'un partenariat entre :

- le Pays d'Albret : financeur de la récolte et du transport, ainsi qu'une partie des frais d'analyse des émissions de fumées
- la CUMA de Mezin : qui a mobilisé le matériel et le personnel pour réaliser la récolte
- les agriculteurs de la SCEA de Comets M. HOWARD et CHERRIER qui ont mis leur parcelle de *Miscanthus* à disposition,
- les agriculteurs de l'EARL du Relais qui ont accepté de réaliser l'essai de combustion sur leur chaudière,
- la société Compte-R qui a suivi l'essai de combustion,
- la société BICAL qui a participé aux frais d'analyse des émissions,
- Arvalis qui a réalisé l'acquisition de données,
- la Chambre d'Agriculture de Lot-et-Garonne qui a coordonné l'ensemble de l'opération.

2 types de valorisations du *Miscanthus* ont été testées lors de l'opération pilote.

une valorisation en tant que combustible pour le chauffage de serres sur L'EARL du Relai,

une valorisation en tant que litière pour chevaux au Lycée agricole Armand Fallières de Nérac

L'impact de la récolte sur le sol et les rhizomes à long terme n'est pas documenté, il sera suivi suite à cette opération.

Le compte rendu suivant présente successivement les conditions pédo-climatiques dans lesquelles le *Miscanthus* a été implanté, le chantier de récolte, ainsi que la valorisation du *Miscanthus* en tant que combustible sur l'EARL du Relai. Ce document reprend les principaux résultats et les observations réalisées.

II. CARACTERISATION DE LA PARCELLE ET DONNEES METEOROLOGIQUES

II. A. Peuplement

Le *Miscanthus* étudié provient d'une parcelle de 10 ha, implantée en 2001 par M. Cherrier et M. Howard pour la société Bical. L'implantation n'a pas été réalisée dans les conditions optimales aujourd'hui préconisées. Les agriculteurs ont utilisé un épandeur à fumier pour répartir les rhizomes sur la parcelle, puis les ont ensuite recouvert par un léger travail du sol. Un rotolabour a été réalisé au printemps de la deuxième année pour favoriser l'éclatement et la multiplication des rhizomes. Le sol argilo-sableux sur lequel la culture a été implantée facilite ce travail du sol.

Une première récolte de rhizomes a été pratiquée en mars 2005 sur 5 ha. La partie aérienne du *Miscanthus* n'a jamais été récoltée depuis son implantation. Elle est simplement broyée et restituée au sol.

Les conditions d'implantation de la culture et la récolte des rhizomes en 2005 expliquent l'irrégularité du peuplement observé sur la parcelle. Des prélèvements réalisés le 13/03/07, présentent des variations de rendement potentiel allant de 4,1 à 13,5 tMS/ha. Les plus hauts rendements potentiels ont été observés le long d'une parcelle irriguée durant l'été 2006. Aucun autre intrant n'a été apporté sur cette parcelle depuis son implantation. La présence de pyrale a été constatée ponctuellement par M HOWARD et M CHERRIER (Photo 1, Photo 2) sans effet notable sur le *Miscanthus* ou les autres cultures environnantes.

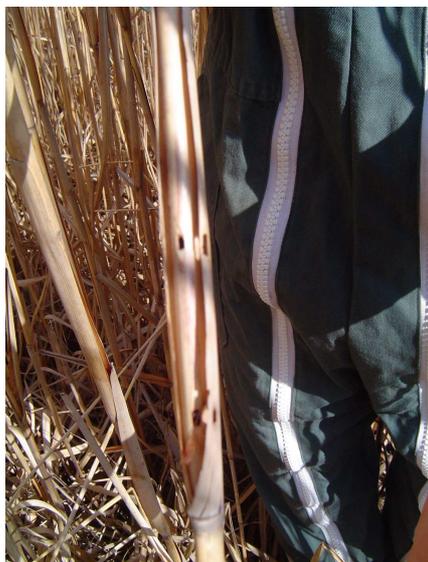


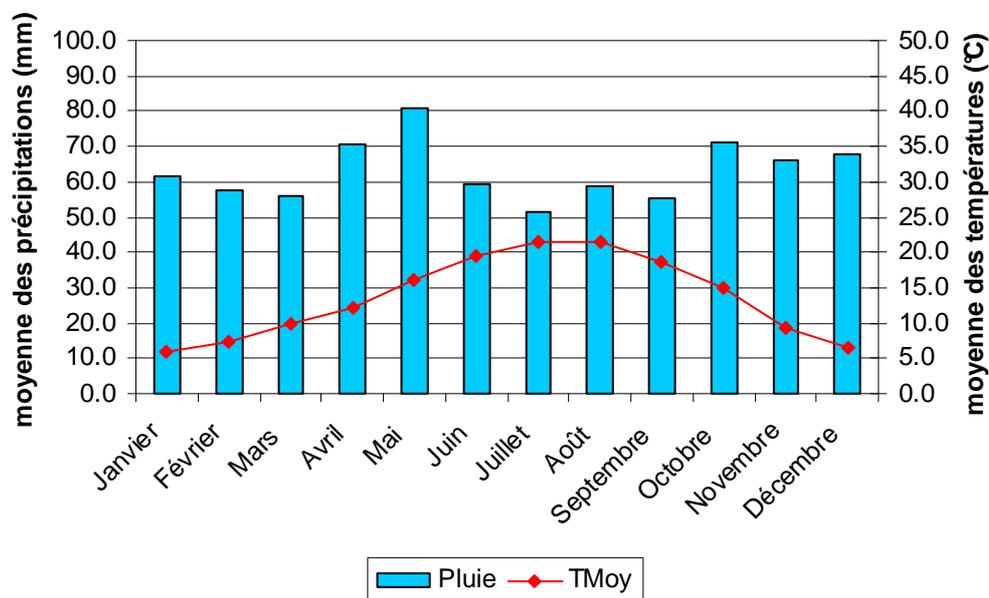
Photo 1: Vue de l'observation de la présence de pyrale sur le *Miscanthus* (Source : Arvalis)



Photo 2: Vue sur les dégâts causés par la présence de pyrale sur le *Miscanthus* (Source : Arvalis)

Enfin, aucune expansion incontrôlée de la plante n'a été constatée . La culture est restée dans les limites de son implantation initiale.

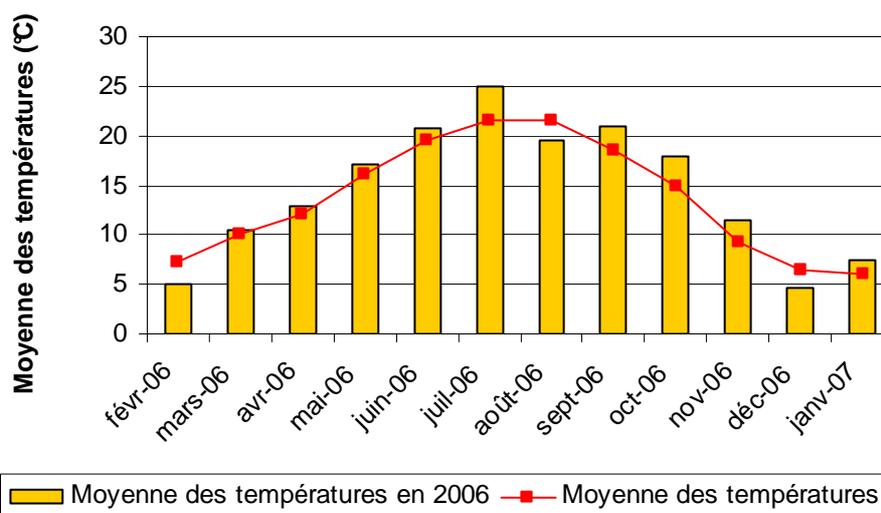
II. B. Normales climatiques



Graphique 1 : Moyennes climatiques mensuelles sur la période 1975 – 2006
(ClimBox, station météorologique de Tonneins – Fauillet – 47)

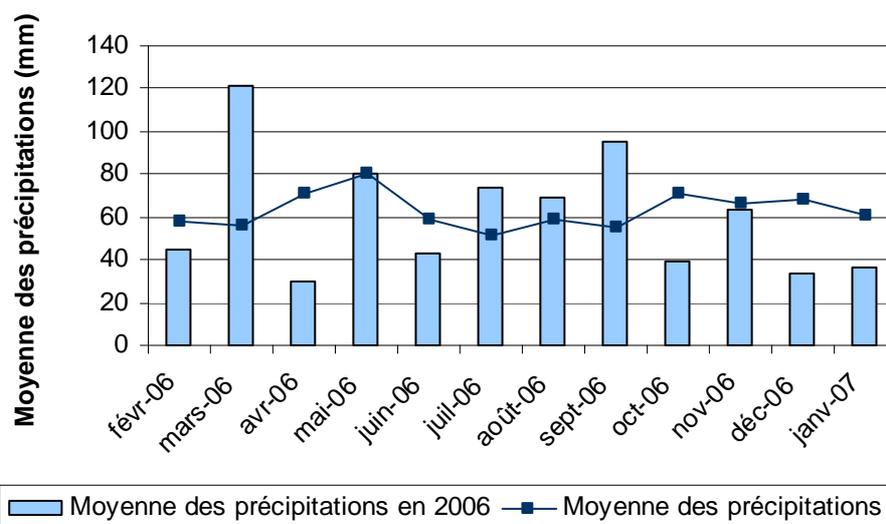
II. C. Bilan climatique de l'année

II. C - 1) Températures



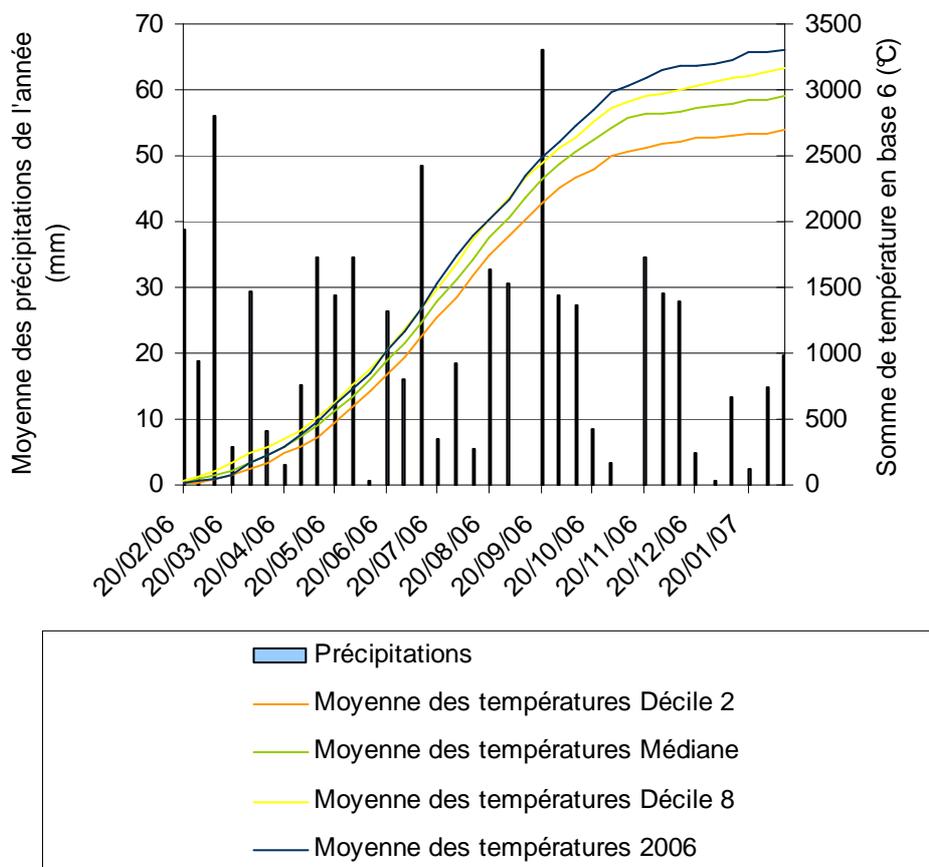
Graphique 2 : Températures moyennes mensuelles en 2006 par rapport à la normale
(ClimBox, station météorologique de Tonneins Tonneins – Fauillet – 47)

II. C - 2) Précipitations



Graphique 3 : Précipitations moyennes mensuelles en 2006 par rapport à la normale (ClimBox, station météorologique de Tonneins Tonneins – Fauillet – 47)

II. C - 3) Synthèse



Graphique 4 : Précipitation et températures journalières, Somme de températures du 01/2006 et 12/2006 (ClimBox, station météorologique de Tonneins Tonneins – Fauillet – 47)

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

Du 11 Février 2006 au 10 Février 2007 à Fauillet :

- 739.6mm
- 3308 degrés-jour en base 6

III. CHANTIER DE RECOLTE ENSILAGE ET MESURES

La récolte du *Miscanthus* a été réalisée le 7 Avril 2007. Deux paramètres ont conditionné cette date :

- sol suffisamment portant pour le matériel de récolte,
- taux d'humidité des cannes entre 17 et 18%.

Le chantier de récolte observé est une récolte type ensilage. Ce type de récolte a été retenu car, il permet de produire d'un biocombustible directement utilisable en chaudière.

L'opération a consisté à vérifier la compatibilité des dispositifs existants avec l'extraction et le transfert du combustible. L'ensemble des données collectées a également eu pour but d'alimenter une base de données sur les temps de travaux et les coûts du chantier pour établir des coûts de production de la culture.

Les mesures ont porté sur :

- le débit de chantier,
- le rendement de la culture,
- la masse volumique du *Miscanthus* ensilé.

III. A. Matériel de récolte

Le matériel de récolte se compose :

- d'une ensileuse John Deer 2700 munie d'un bec Kemper.
- de 2 tracteurs accompagnés de leur benne

Tableau 1 : Caractéristiques techniques du matériel de récolte du *Miscanthus*

Caractéristiques techniques		
Ensileuse John Deer 2700		Source
Moteur	Power Tech, 6 cylindres en ligne, 8.1 l	Constructeur
Puissance (ch)	315	Constructeur
Transmission	Hydrostatique, 3 vitesses	Constructeur
Largeur Coupe	Bec Kemper, 3.2 m	Entrepreneur
Nombre de couteau du rotor	27	Entrepreneur
Poids (t)	9.7 t	Constructeur
Age (campagnes)	1	CUMA
Nombre d'heures (h)	370 h dont 260 h rotor	CUMA
Vitesse de rotation du rotor (tr/min)	1060	Constructeur
Réglages	Seulement 1 couteau sur 2	CUMA
Utilisations annuelles (h)	300	Entrepreneur
Consommation (l/h)	50	CUMA
Massey Ferguson avec benne Gilibert		Source
Puissance du tracteur (ch)	100	CUMA
Nombre de roues motrices	4	Entrepreneur
Poids à vide de la benne (t)	8.50	Entrepreneur
Volume de la benne (m³)	16.56	Entrepreneur
Nombre d'essieux	3	
New Holland avec benne Gilibert		Source
Puissance du tracteur (ch)	135	CUMA
Nombre de roues motrices	4	Entrepreneur
Poids à vide de la benne (t)	8.50	Entrepreneur
Volume de la benne (m³)	16.56	Entrepreneur
Nombre d'essieux	3	



Photo 3 : Vue sur le bec Kemper de l'ensileuse
(Source : Pôle énergie CA 47)



Photo 4 : Vue de l'ensileuse et du tracteur Massey Ferguson
(Source : Pôle énergie CA 47)

III. B. Déroulement de la récolte

Les difficultés rencontrées pendant la récolte ont été liées à l'état de la parcelle qui, malgré les bonnes conditions apparentes, était encore gorgée d'eau sur un secteur. Le risque d'immobilisation de l'ensileuse étant élevé, ce secteur n'a pas été récolté (Photo 5). Par ailleurs, compte tenu de l'absence de *Miscanthus* sur les bords de la parcelle, la surface récoltée au final est évaluée à 6 ha.



Photo 5: Vue de l'ensileuse, du tracteur New Holland et des ornières sur la parcelle (Source : Pôle énergie CA 47)

III. C. Débit de chantier

La vitesse moyenne instantanée a été mesurée sur une distance de 120 m. La vitesse instantanée correspond à la vitesse moyenne de l'ensileuse sur une distance donnée ; ici 120m. L'opération de chronométrage a été renouvelée 4 fois.

Une vitesse moyenne de chantier est ensuite évaluée en prenant en compte les arrêts ou encore les virages.

Tableau 2 : Débit de chantier de l'opération d'ensilage du *Miscanthus*

	Unité	Valeur
Débit de chantier instantané	ha/h	2.7
Vitesse moyenne instantanée au compteur (arrêts compris + virages)	km/h	8.4

III. D. Rendements observés

Le rendement a été calculé sur la base de 17 mesures de pesées différentielles : 7 sur la benne du Massey Ferguson, 10 sur la benne du New Holland (Tableau 3)

Tableau 3 : Evaluation du rendement du *Miscanthus*

Equipement	Nombre de pesées	Poids en matières sèches total (kg)	Surface récoltée (ha)	Rendement moyen (t MS/ha)
New Holland	10	15600	/	/
Massey Ferguson	7	9900	/	/
Benne supplémentaire		700	/	/
Total	17	26200	6	4.367

Toutes les bennes ont été pesées, excepté la dernière estimée à l'œil pour 700 à 800kg. Cette benne était à destination du centre équestre du Lycée agricole de Nerac, qui souhaitait tester le *Miscanthus* comme litière pour chevaux.

III. E. Masse volumique

La masse volumique a été évaluée :

- pour la détermination du poids des produits, par pesée différentielle des bennes en charge et à vide avec 2 pesées électroniques fonctionnant par addition des poids d'essieux (Photo 6),



Photo 6 : Vue de la pesée du matériel de récolte
(Source : Pôle énergie CA 47)

- pour la détermination du volume des remorques : estimation visuelle, mesure ...

La masse volumique a été évaluée sur la base de 11 mesures du volume transporté (4 sur la benne du tracteur Massey Ferguson, 7 sur la benne du tracteur New Holland).

Tableau 4 : Evaluation de la masse volumique du *Miscanthus*

Nombre de bennes	Poids total de matière sèche (kg)	Volume observé (m ³)	Masse volumique (kg/m ³)
Massey Ferguson + benne (4 bennes)	7240	62	116.77
Benne + New Holland (7 bennes)	12640	102.5	123.32

Il y a une disparité non négligeable des estimations de la masse volumique faites sur chacune des bennes, mais également pour une même benne :

- 110 à 140 kg/m³ pour le New Holland,
- 112 à 121 kg/m³ pour le Massey Ferguson.

La disparité des résultats pourrait provenir :

- de l'estimation à l'œil du volume de *Miscanthus* récolté,
- du fait que toutes les bennes n'ont pas été estimées,
- d'un tassement du *Miscanthus* et de la hauteur de chute dans la benne.

III. F. Stockage en bout de champ du *Miscanthus*

Au fur et à mesure de la récolte, le *Miscanthus* a été stocké en bout de parcelle à l'air libre, puis repris pour chargement des camions (Photo 7, Photo 8) à l'aide de tracto-pelles. Cette opération permettait de libérer les bennes pour récolter le reste de la parcelle et effectuer les relevés suivants. Compte tenu de la faible densité du produit, cette opération qui exige de nombreuses manipulations est coûteuse en temps.



**Photo 7 : Vue du stockage du *Miscanthus* ensilé en bout de parcelle
(Source : Pôle énergie CA 47)**



**Photo 8 : Vue du chargement du *Miscanthus* dans les camions
(Source : Pôle énergie CA 47)**

IV. ESSAI COMBUSTION MISCANTHUS

L'essai a été réalisé sur 5 jours.

Les mesures portaient sur :

- › L'extraction et le transfert du combustible
- › La combustion du *Miscanthus*
- › Le rendement énergétique
- › Les émissions de gaz et de poussières

IV. A. La chaudière pilote

IV. A - 1) Caractéristiques de la chaudière pilote

La chaudière utilisée est une chaudière COMPTE-R de type C 250 DH-P compacte d'une puissance nominale de 2.9 MWth et réelle de 2.5 MWth (Figure 1). Les chaudières sont dites « compactes » car toute l'installation (foyer, échangeur, dépoussiéreur à fumées, armoire de programmation) est logée dans un même habitacle.

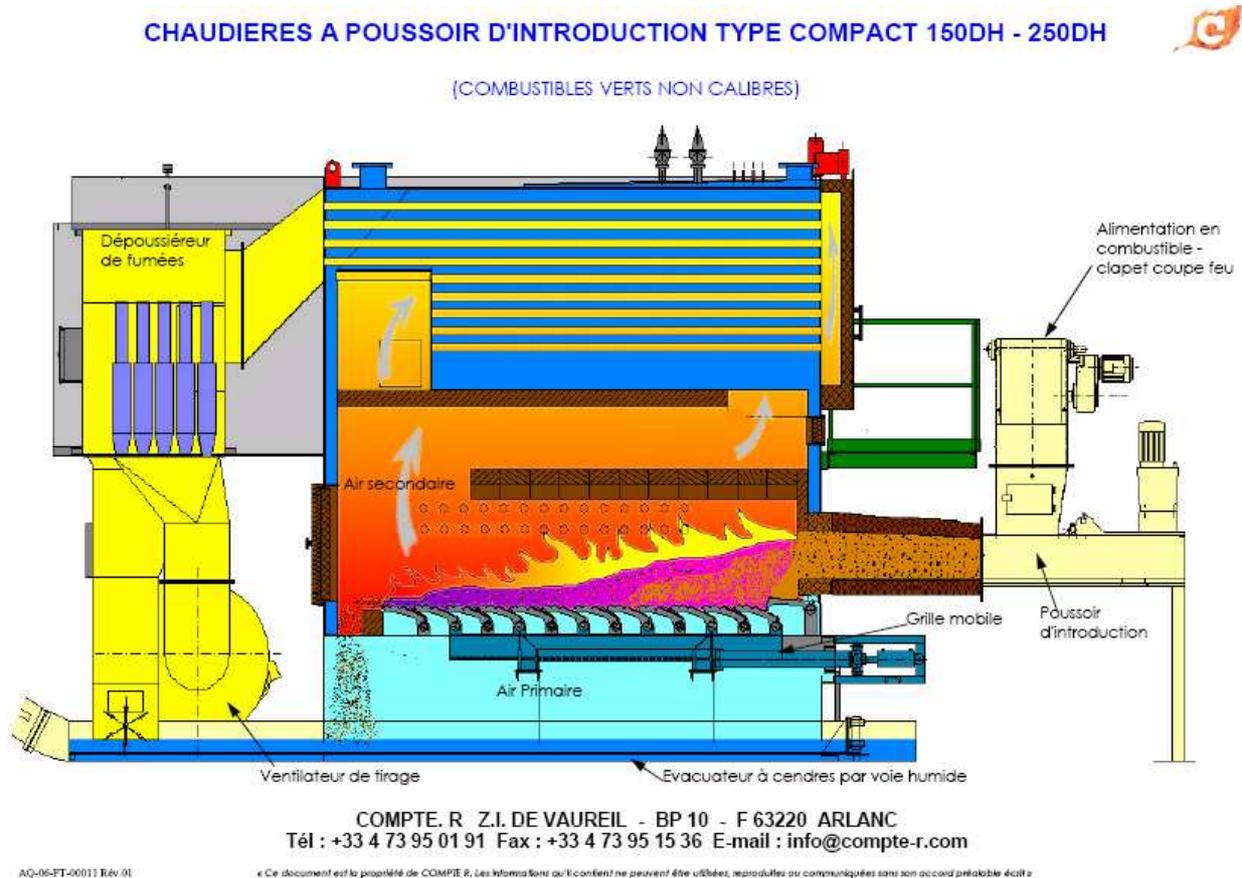


Figure 1 : Vue en coupe d'une chaudière de la série DH COMPACT (Source : Pôle énergie CA 47)

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

Ce type de chaudière est adapté à un combustible de type humide (50% d'humidité maximum). La puissance utile de la chaudière dépend de ce taux d'humidité (Tableau 5).

Tableau 5 : Puissance délivrée par la chaudière en fonction de l'humidité du combustible (Source : COMPTE-R)

Puissance utile (kW)	Humidité sur brut (%)	PCI sur brut (kWh/t)	Rendement (%)	Consommation (kg/h)	Masse volumique (kg/m ³)	Consommation (m ³ /h)
2980	15	4200	85.5	830	210	3.95
2790	30	3400	84.0	977	240	4.07
2500	45	2500	82.5	1212	290	4.18

La chaudière utilisée au cours de l'opération « *Miscanthus* » consomme habituellement du broyat de bois recyclé dont le taux d'humidité varie entre 25 et 35%.

IV. A - 2) Alimentation de la chaudière

L'alimentation en combustible du foyer est entièrement automatisée. Elle est fonction de la quantité de chaleur à produire. Ce sont les paramètres de combustion du foyer (teneur en O₂ et température des fumées) qui déterminent la vitesse d'approvisionnement en combustible.

L'extraction du produit est réalisée grâce à 3 échelles racleuses à commande hydraulique (Photo 9).



Photo 9 : Vue des échelles racleuses recouvertes par du *Miscanthus* ensilé (Source : Pôle énergie CA 47)

Un convoyeur à chaîne et tasseaux achemine ensuite le produit vers le système d'introduction du combustible (Photo 10).



Photo 10 : Vue du convoyeur (Source : Pôle énergie CA 47)

L'alimentation du foyer se fait par un système à introduction par poussoir : un piston injecteur coulissant dans un canal étanche permet l'acheminement du combustible sur la grille du foyer (Photo 11). La fréquence des coups de poussoir permet de réguler l'allure de la chaudière.



Photo 11 : Vue du foyer et des grilles mobiles avec dans le fond du *Miscanthus* (Source : Pôle énergie CA 47)

IV. A - 3) Fonctionnement de la chaudière

a. Le foyer

Les parois du foyer de la chaudière sont recouvertes d'une garniture réfractaire et sont calorifugées : refroidissement à l'eau. Cette technique permet d'abaisser la température du foyer et de limiter la formation de mâchefers. La partie supérieure du foyer est voûtée et est constituée de briques réfractaires.

Il s'agit d'une chaudière à grille horizontale et mobile. La mobilité de la grille permet d'étaler le combustible sur la longueur du foyer pour éviter la formation de mâchefer et de conduire les cendres vers l'évacuateur. L'évacuation des cendres et des suies est commune. Elle se fait par voie humide. Un convoyeur situé sous la grille et sous le dépoussiéreur permet leur extraction.

b. L'admission d'air

▪ **Air primaire**

L'admission d'air primaire se fait en dessous de la grille. L'air primaire injecté n'est pas constitué d'air recyclé. La quantité d'air primaire injectée dans la chaudière constitue le deuxième paramètre permettant de modifier l'allure de la chaudière.

▪ **Air secondaire**

L'air secondaire est injecté au dessus de la flamme par les côtés de la chaudière. Une partie de l'air secondaire est constitué d'air recyclé en provenance des fumées. Cela permet d'éviter une montée en température trop haute. En effet, la teneur en O₂ de l'air recyclé est moins importante que celle de l'air primaire, la combustion est par conséquent moins vive. La part d'air recyclé injecté dans le foyer est variable. Elle varie entre 15 et 25%.

c. L'échangeur

En sortie du foyer, la fumée passe par une série de chambres puis dans un échangeur. Celui-ci permet d'extraire la chaleur grâce à un circuit d'eau. Il est constitué de 2 parcours de tubes de fumées autour desquels l'eau s'écoule de façon laminaire. Un ramonage automatique permet d'éviter l'encrassement de l'échangeur. Le ramonage consiste en l'injection d'air comprimé à une pression de 10 Bar.

L'eau chaude produite permet le chauffage de serres. Lorsque la température de consigne est atteinte dans les serres, la chaleur est stockée dans un ballon tampon. Un compteur à calories installé sur la chaudière permet de mesurer la quantité d'énergie thermique produite.

IV. A - 4) Traitement des fumées

Le taux de poussières ou d'imbrûlés dans les fumées est réduit grâce à un système de type multi-cyclones. Ces systèmes permettent d'isoler certains éléments solides par centrifugation. Les fumées ainsi traitées sont en partie recyclées pour l'injection d'air secondaire.

IV. A - 5) Régulation de la chaudière

Une fois les premiers réglages réalisées, afin de permettre une bonne combustion du combustible, la régulation de la chaudière est automatique (régulation modulante avec contrôle de température de flamme, de dépression de la chambre, du dioxygène résiduel dans les fumées, des températures de l'eau et des fumées). Des sondes permettent cette régulation. L'allure passe alors à 25% lorsque toutes les consignes sont atteintes (Photo 12).

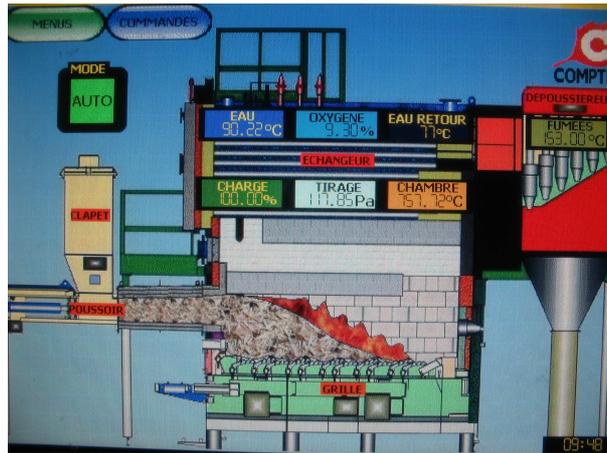


Photo 12 : Vue du tableau écran de gestion de la chaudière fournissant les informations sur son fonctionnement (Source : Pôle énergie CA 47)

IV. B. Déroulement de l'essai

L'essai s'est déroulé sur 5 jours.

IV. B - 1) Premier jour d'essai (16/04/2007) : nettoyage préalable

- Les grilles, les parois et les voûtes réfractaires du foyer ont été totalement nettoyées,
- Les parcours de fumées de l'échangeur ont été ramonés.
- Le dépoussiéreur et les conduits de fumées ont été nettoyés,
- Le convoyeur et la benne à cendres ont été vidangés.

IV. B - 2) Deuxième jour d'essai (17/04/2007) : fin du nettoyage, mise en route de la chaudière, stabilisation du fonctionnement.

Fin du nettoyage de l'installation.

Mise en place de l'installation d'analyse des fumées par la société BUREAU VERITAS. BUREAU VERITAS est un organisme d'évaluation et de contrôle qui délivre des rapports de conformité vis-à-vis de la réglementation.

Début de l'essai le 17/04 à 16h30. Démarrage de la chaudière (Photo 13).

- Mise à 0 du compteur de nombre de coups de poussoir,
- Relevé du compteur d'énergie : 10.806,8 MWh.



Photo 13 : Vue du foyer en fonctionnement
(Source : Pôle énergie CA 47)

La chaudière est maintenue en fonctionnement pendant la nuit du 17 au 18/04/2007 à allure fixe de 25%. L'air primaire a été fortement réduit par rapport aux réglages utilisés lors de la combustion du bois pour limiter les envols du combustible (le *Miscanthus* est très léger, donc volatil). L'air secondaire et le recyclage des fumées restent identiques par rapport aux réglages pour le bois.

IV. B - 3) Troisième jour d'essai (18/04/2007) : contrôle des rejets atmosphériques

Suite des essais le 18/04 sur 3 périodes de 30 minutes. 3 séries de mesures sont réalisées : avec prise de mesure de rejets atmosphériques entre 10h30 et 12h14 sur fonctionnement stabilisé de la chaudière.

- Des échantillons de polluants ont été prélevés. L'analyse de ces prélèvements permet de connaître les émissions en poussières, monoxyde de carbone, oxyde de soufre et composés organiques volatils.
- Des mesures connexes ont été effectuées : pression statique, température des gaz, humidité, teneur en dioxyde de carbone et dioxygène.
- Le compteur calorimétrique et le nombre de coups de poussoir ont été relevés à la fin de ces 3 périodes de mesure.
- Les relevés de cartes des pressions dynamiques ont été effectués ponctuellement au long de l'expérimentation.

D'après l'organisme de prélèvement, l'utilisation d'un seul orifice de mesure a contraint l'exploration du champ de vitesse sur l'axe perpendiculaire en inclinant la sonde de Pitot alternativement de gauche à droite du conduit à une distance de 5 cm du bord. Le prélèvement de poussières n'a pas pu se faire conformément à la norme sur tous les axes.

IV. B - 4) Quatrième jour d'essai (19/04/2007) : évaluation de l'état de la chaudière à l'arrêt

La chaudière est arrêtée pour établir les premières constatations, puis elle est redémarrée pour achever la combustion de produit restant.

IV. B - 5) Cinquième jour d'essai (20/04/2007) : arrêt définitif de la chaudière, derniers relevés et évaluations

La chaudière est stoppée à 14h00. Des derniers relevés et calculs sont effectués :

- Relevée du compteur calorimétrique et le nombre de coups de pousoir,
- Evaluation de la quantité de cendres récupérées dans le cendrier.

IV. C. Prélèvements effectués au cours de la combustion

IV. C - 1) Prélèvement du *Miscanthus* en entrée de chaudière

La caractérisation de la composition de la matière première permet d'expliquer une partie des phénomènes se déroulant lors de la combustion.

La connaissance du PCI détermine les réglages et ajustements préalables de la chaudière. La teneur en silice est un des éléments explicatifs de la quantité de cendres produites, de la formation de mâchefer, des températures observées de fusion des cendres. D'autres éléments tels que la teneur en éléments azotés, la teneur en soufre et la teneur en chlorures sont à corrélérer avec les valeurs d'émissions de polluants mesurées.

La prise d'échantillons s'est effectuée en entrée de chaudière. Les échantillons ont été expédiés :

- au laboratoire d'analyses biochimiques de Boigneville (Laboratoire ARVALIS, LABB) pour la mesure du pouvoir calorifique supérieur (PCS),
- au laboratoire d'analyse et de contrôles INZO de Château-Thierry pour quelques analyses de base :
 - Humidité
 - Matières minérales : donnent le taux de cendres à 500 °C,
 - Azote : les composés azotés peuvent expliquer la formation d'oxydes d'azote,
 - Chlorures (NaCl) : les composés chlorés peuvent expliquer la formation de divers composés tels que les dioxines,
 - Insoluble chlorhydrique : approche la teneur en silice,
 - Potassium
 - Soufre : les composés soufrés peuvent expliquer la formation d'oxydes de soufre

IV. C - 2) Prélèvement des cendres issues de la combustion

De même, l'étude de la composition des cendres peut expliquer le déroulement de la combustion : complète, incomplète, vitrification... Elle peut également permettre de déterminer les possibilités de valorisation : épandage, recyclage, déchets ultimes...

Les cendres prélevées sont les cendres du foyer et les suies en sortie de convoyeur dans le bac de déchargement. L'échantillon a été expédié au laboratoire d'analyse et de contrôles INZO de Château-Thierry pour quelques analyses de base détaillées dans le

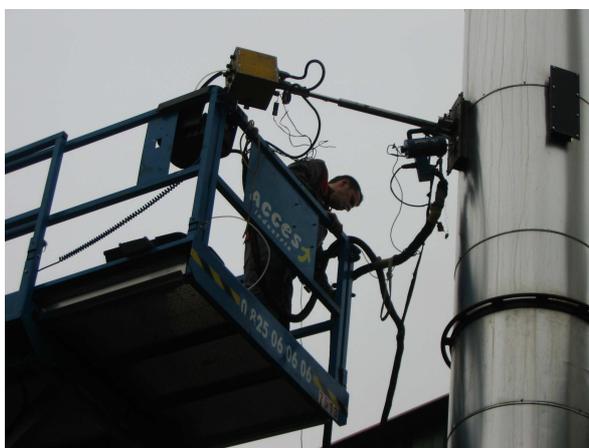
Tableau 6.

Tableau 6: Liste des éléments analysés sur les cendres du foyer (Source : Laboratoire d'analyses et de contrôles INZO)

Caractéristiques du combustible	Humidité, Valeur neutralisante
Eléments divers	C, NaCl
Eléments fertilisants	N, P, K
Oligo-éléments et éléments neutralisants	Cu, Fe, Mo, Mg, Zn, Ca, S
Eléments trace	As, Co, Cd, Hg, Pb, Si

IV. C - 3) Analyse des fumées

L'installation du matériel d'analyse des fumées a eu lieu le 18/04 (Photo 14).



**Photo 14: Vue du système d'analyse des fumées
(Source : Pôle énergie CA 47)**

a. Analyse d'émission des gaz

Les prélèvements sont effectués le 18/04 sur 3 cycles de 30 minutes et sont réalisés par BUREAU VERITAS.

La chaudière est concernée par l'arrêté du 25 Juillet 1997 relatif aux installations de 2 à 20 MW classées pour la protection de l'environnement. L'arrêté fixe des valeurs limite d'émissions applicables aux chaudières.

Les composants à analyser dans ce cadre sont les poussières totales, CO, CO₂, NO_x, SO₂ et COV (Composés organiques volatiles) non méthaniques.

Les détails des méthodes et des normes d'analyse de ces composants sont présents en Annexe 1.

b. Evaluation de la masse des poussières dans l'air

L'évaluation de la masse des poussières dans l'air est réalisée par l'Institut Technique des Gaz et de l'Air (ITGA) à la demande de BUREAU VERITAS.

Une fois la masse des poussières établie, les échantillons retournent chez BUREAU VERITAS, où l'indice pondéral est établi en fonction de la quantité d'air prélevé pendant la prise d'échantillons.

Les détails des méthodes et des normes d'analyse de ces composants sont présents en Annexe 2.

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

c. Evaluation de l'émission de SO₂

L'évaluation de l'émission de SO₂ dans l'air est réalisée par CARSO- Laboratoire Santé et Environnement Hygiène de Lyon à la demande de BUREAU VERITAS.

De la même façon, une fois la masse de SO₂ établie, les échantillons retournent chez BUREAU VERITAS, où l'émission est établie en fonction de la quantité d'air prélevé pendant la prise d'échantillons.

Les détails des méthodes et des normes d'analyse de ces composants sont présents en Annexe 3.

V. RESULTATS DE L'ESSAI COMBUSTION MISCANTHUS

L'essai de combustion a été limité par la faible quantité de chaleur exigée par les serres à cette période, et par la quantité de *Miscanthus* récoltée disponible pour l'essai.

V. A. Suivi de la manutention

Le *Miscanthus* ensilé est déposé dans la benne à fond plat. Le mouvement de va-et-vient des échelles permet d'acheminer le produit vers le convoyeur. Arrivé en bout de convoyeur, le *Miscanthus* s'écoule dans le conduit d'alimentation du poussoir.

Il s'écoule plus facilement que des plaquettes de bois, et s'accumule dans le coude en partie basse. Le dispositif d'alimentation à poussoir hydraulique est adapté au produit. Cela représente l'avantage de permettre l'acceptation des plaquettes de bois et du *Miscanthus*, seuls ou en mélange. Des adaptations sont cependant envisageables au niveau du dispositif de transfert ou au niveau du poussoir d'introduction.

V. B. Suivi de la combustion

L'essai de combustion a été limité par la faible quantité de chaleur exigée par les serres à cette période, et par la quantité de *Miscanthus* récoltée disponible pour l'essai.

V. B - 1) Déroulement de la combustion

La combustion a été stable et homogène en terme de température et de répartition du produit sur la grille. La grille du foyer était couverte sur environ 1/3 de sa surface. Cela confirme la pertinence du *Miscanthus* comme combustible puisque très peu de réglages ont été nécessaires.

V. B - 2) Analyse visuelle du foyer lors de l'arrêt de la chaudière

Les cendres ne se sont pas vitrifiées dans le foyer, ni sur la grille, ni sur les réfractaires. Aucune trace de mâchefer n'a été signalée. Cependant un léger dépôt de cendres grises sur les parois a été constaté. La présence de cendres n'a pas été relevée sur les voûtes, ce qui indique que les cendres volantes ont été correctement entraînées dans le dépoussiéreur.

Ces résultats devront être confirmés lors d'une combustion sur un temps plus long.

V. B - 3) Analyse visuelle des tubes de fumées lors de l'arrêt de la chaudière

Aucun encrassement particulier n'a été constaté au niveau des tubes de fumées : pas de formation de « nids d'hirondelles » à l'entrée au premier parcours de tubes.

V. B - 4) Analyse de la puissance développée par la chaudière pendant la combustion

La puissance thermique délivrée par la combustion du *Miscanthus* a été relevée à 2 reprises le 18/04 (Tableau 7).

Tableau 7: puissance thermique délivrée par la chaudière en fonction des périodes de relevés du 18/04 (Source: COMPTE-R)

Période	10h-12h	18h-23h30
Puissance délivrée par la chaudière (kW)	2100	2040

La puissance utile annoncée par le constructeur est rappelée plus haut dans le Tableau 5. Elle se situe entre 2500 et 2980 kW. La puissance thermique délivrée par la combustion du *Miscanthus* est inférieure aux moyennes prévues. Une quantité de *Miscanthus* insuffisante a donc été incorporée.

La phase de chargement du convoyeur est limitée pour le *Miscanthus*. Le temps d'un cycle d'introduction est de 52 à 58 secondes. Le cycle d'introduction représente les étapes entre la mise en route des échelles racleuses, le chargement d'un certain volume de *Miscanthus* sur le convoyeur, l'ouverture du clapet d'alimentation, l'introduction du *Miscanthus* et la fermeture du clapet.

Le nombre maximum de cycles d'introduction est donc de 60 cycles/heure. Etant donné que le volume du poussoir est de 110 litres, et que le *Miscanthus* a une masse volumique inférieure à celle du bois, le nombre de coup et donc la quantité de combustible introduit n'ont pas permis de délivrer la puissance maximale de la chaudière.

V. C. Analyse de la matière première combustible

V. C - 1) Analyse élémentaire

La caractérisation de la composition de la matière première permet d'expliquer une partie des phénomènes se déroulant lors de la combustion.

La procédure d'échantillonnage s'est déroulée lors des 3 périodes d'essais. Pendant chaque période une certaine quantité de *Miscanthus* a été prélevé sur le convoyeur (Photo 15). Au final 3 échantillons sont été prélevés.



Photo 15: Vue sur le prélèvement des échantillons
(Source: Pôle énergie CA 47)

a. Analyse de la composition du Miscanthus

Tableau 8: Analyse du *Miscanthus* en entrée chaudière (Source : Laboratoire d'analyses et de contrôles INZO)

		Résultats
Humidité	% produit brut	10.85
Matières minérales	%MS	2.33
Azote	%MS	2.51
Chlorures (NaCl)	%MS	< A LQ 0.10
Insoluble chlorhydrique	%MS	1.46
Potassium	%MS	0.12
Soufre	%MS	0.0046

LQ : limite de quantification

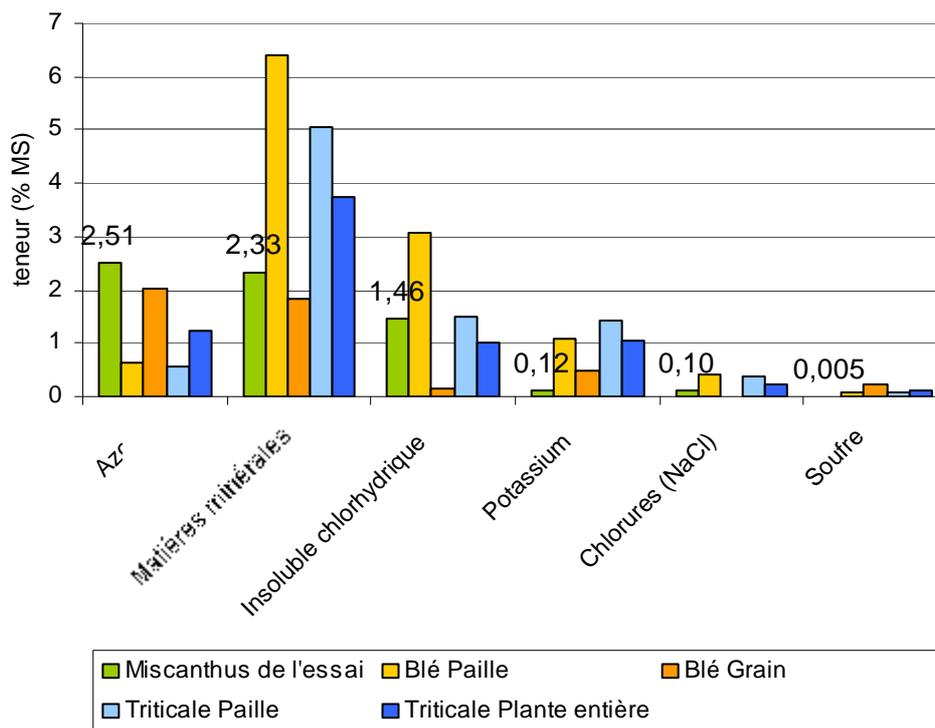
Le taux de cendre s'élève à 2.33% du taux de matière sèche.

La teneur en chlorures de l'échantillon est très faible, puisqu'elle est inférieure au seuil de détection.

L'analyse élémentaire des cendres de la matière première révèle un taux d'insolubles chlorhydriques très faible (1.46%). Aucune trace de mâchefer n'a été constatée dans le foyer après la combustion.

b. Comparaison de la composition du Miscanthus avec d'autres biocombustibles

Les résultats de l'analyse élémentaire du *Miscanthus* de l'essai présentés sur le Graphique 5 sont comparés avec d'autres biocombustibles (Blé et Triticale).



Graphique 5: Comparaison de la composition chimique du *Miscanthus* avec d'autres biocombustibles (Source Blé et Triticale : Arvalis - Institut du Végétal)

La teneur en azote du *Miscanthus* étudié est plus importante que celle des autres biocombustibles. A l'exception de cet élément, le *Miscanthus* présente des taux inférieurs aux autres biocombustibles. Seul le blé en grain obtient parfois de meilleurs résultats.

D'après la composition élémentaire du *Miscanthus* étudié, sa combustion serait susceptible de dégager plus de NO_x que les autres biocombustibles. Cependant, le taux de composés chlorés ou de soufre dans les émissions seraient nettement plus faibles. La quantité de cendres formées et le risque de formation de mâchefer seraient moins importants.

→ La comparaison de l'analyse élémentaire du *Miscanthus* de l'essai avec d'autres biocombustibles a montré que la teneur en azote de la culture était importante. La forte teneur en azote peut être à l'origine de fortes émissions de NO_x.

V. C - 2) Analyse du pouvoir calorifique

a. Estimation du PCS du *Miscanthus* de l'essai en laboratoire

Les résultats de l'analyse réalisée en laboratoire sont détaillés dans le Tableau 9.

Tableau 9: Rapport d'analyse du PCS (Source : ARVALIS – Institut du Végétal)

Préparation : broyé 0.5

Matière sèche résiduelles (Moy. MSR)	%	90.25
Energie brute (Moy. BB/S) = PCS	kcal/kg MS	4578

La teneur en hydrogène du *Miscanthus* étant d'environ 5.45 % de MS (ADEME, ITCF, 1998), le PCS sur sec converti en PCI humide donne : 4266 kcal/kg MS soit 17 861 kJ/kg MS.

b. Estimation du PCI suite à l'essai de combustion

Sur la durée totale de l'essai, la combustion du *Miscanthus* a produit 84,2 MWh. Le rendement de la chaudière est d'environ 80% puisqu'elle a fonctionné à 25% dans la nuit du 17 au 18 Avril. L'énergie totale produite par la combustion est de 16 819 J/kg MS.

La différence entre les deux méthodes de calcul est de 1 MJ/kg MS. D'après M CHIEZE de la société COMPTE-R, la différence serait due à une combustion incomplète du *Miscanthus* et une perte d'énergie sur les imbrûlés. Les techniciens ayant participé à l'essai ont fait remarqué une quantité importante d'imbrûlés dans les conduits d'échappement de l'installation.

V. D. Analyse des fumées

V. D - 1) Estimation de la masse des poussières

Les résultats de l'analyse de masse de poussières sont détaillés dans l'Annexe 1.

Le résultat de ces échantillons a été envoyé à BUREAU VERITAS où il est ensuite divisé par le nombre de m³ d'air prélevé durant la prise d'échantillon.

De la même façon, les résultats des échantillons d'analyse des rejets de SO₂ ont été envoyés à BUREAU VERITAS pour être ramenés en mg/m³ d'air prélevé durant la prise de l'échantillon. Les résultats de cette analyse sont détaillés dans l'Annexe 2.

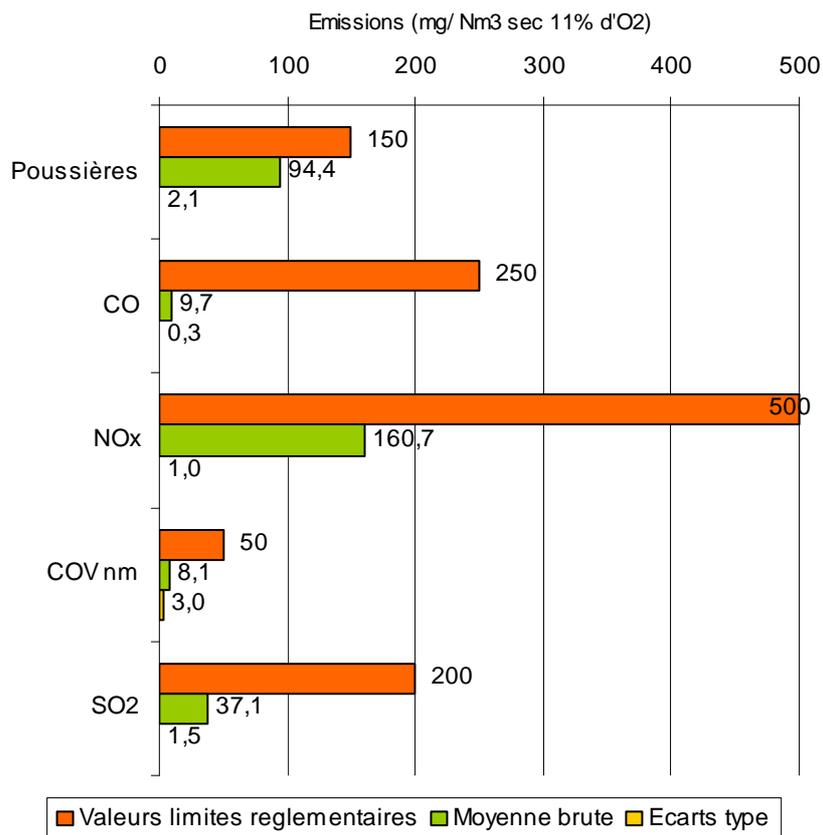
V. D - 2) Analyse gazeuse des prélèvements

a. Miscanthus seul

La mission de cet essai était de vérifier l'impact des rejets atmosphériques de l'installation sur l'environnement lors de la combustion du *Miscanthus*, en tenant compte des prescriptions de l'arrêté d'autorisation d'exploiter du 25 Juillet 1997.

Le Graphique 6 renseigne sur les concentrations en poussières, CO, NO_x, COV nm et SO₂. Les concentrations observées lors de l'essai sont comparées avec les limites réglementaires. L'écart type des émissions permet d'évaluer leur homogénéité lors de la combustion.

Ces données sont extraites des résultats fournis par BUREAU VERITAS et qui sont présentés en Annexe 3.



Graphique 6: Concentration des émissions en éléments polluants au cours de la combustion du *Miscanthus*
(Source : BUREAU VERITAS)

Les prélèvements réalisés sur les fumées durant l’essai révèle sur le Graphique 6, un indice pondéral de poussières de 94,4 mg/Nm³. Il s’agit de l’émission la plus importante par rapport à la limite réglementaire (63%). Les émissions de poussières sont suivies par les émissions de NO_x avec 160,7 mg/Nm³ (32% du seuil réglementaire). Les composés restants sont largement en dessous des limites imposés par la réglementation (moins de 20%).

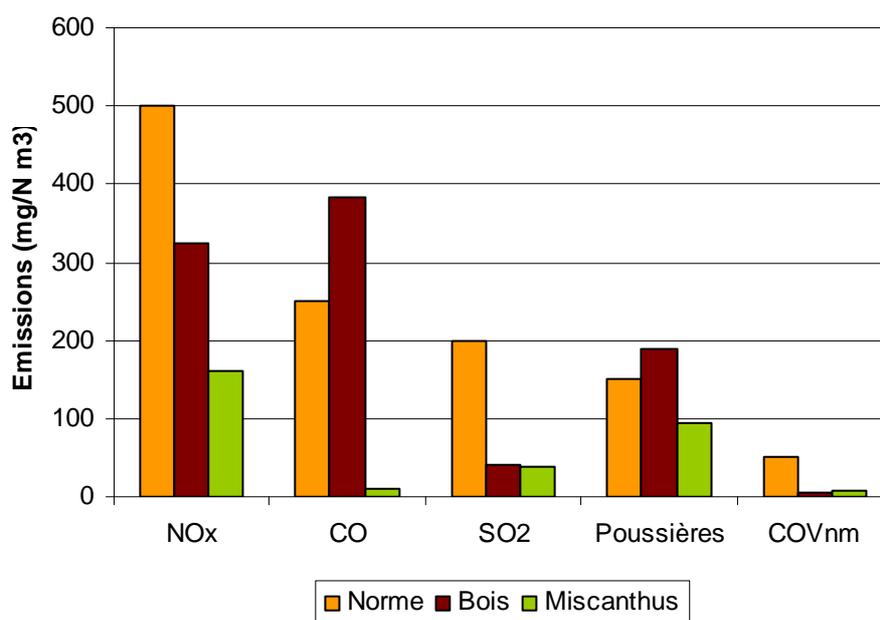
→ Dans les conditions définies pour l’essai, la situation générale d’un point de vue « rejets atmosphériques » est conforme pour tous les paramètres étudiés. Toutes les concentrations sont inférieures aux seuils réglementaires.

b. Comparaison du *Miscanthus* avec le bois

Le Tableau 10 issu d’une publication (ALLEMAND N, 2003), renseigne sur les concentrations d’émissions de CO, NO_x, SO₂, COV nm et poussières issus de la combustion du bois. Ces données permettent de comparer le *Miscanthus* au bois.

Tableau 10: Concentration en éléments sur un panel de chaudières industrielles et de chauffage collectif au bois

Concentrations en éléments (mg/Nm ³)	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
CO	8	1925	384	468
NO _x	77	972	324	226
SO ₂	0.3	186	40	47
COV nm	0.11	35	6	8
Poussières	10	1074	190	232



Graphique 7: Comparaison des émissions moyennes en divers polluants sur *Miscanthus* et Bois (Source bois: Allemand N.; CIPETA, Mars 2003, convention ADEME n°01 01 080)

Les émissions de divers polluants suite à la combustion du *Miscanthus* sont toutes en dessous des normes. La combustion du bois dégage du CO et des poussières à des teneurs supérieures aux normes. Les émissions de polluant issues de la combustion du bois sont supérieures à celles issues de la combustion du *Miscanthus* de l'étude, à une exception : les COV nm.

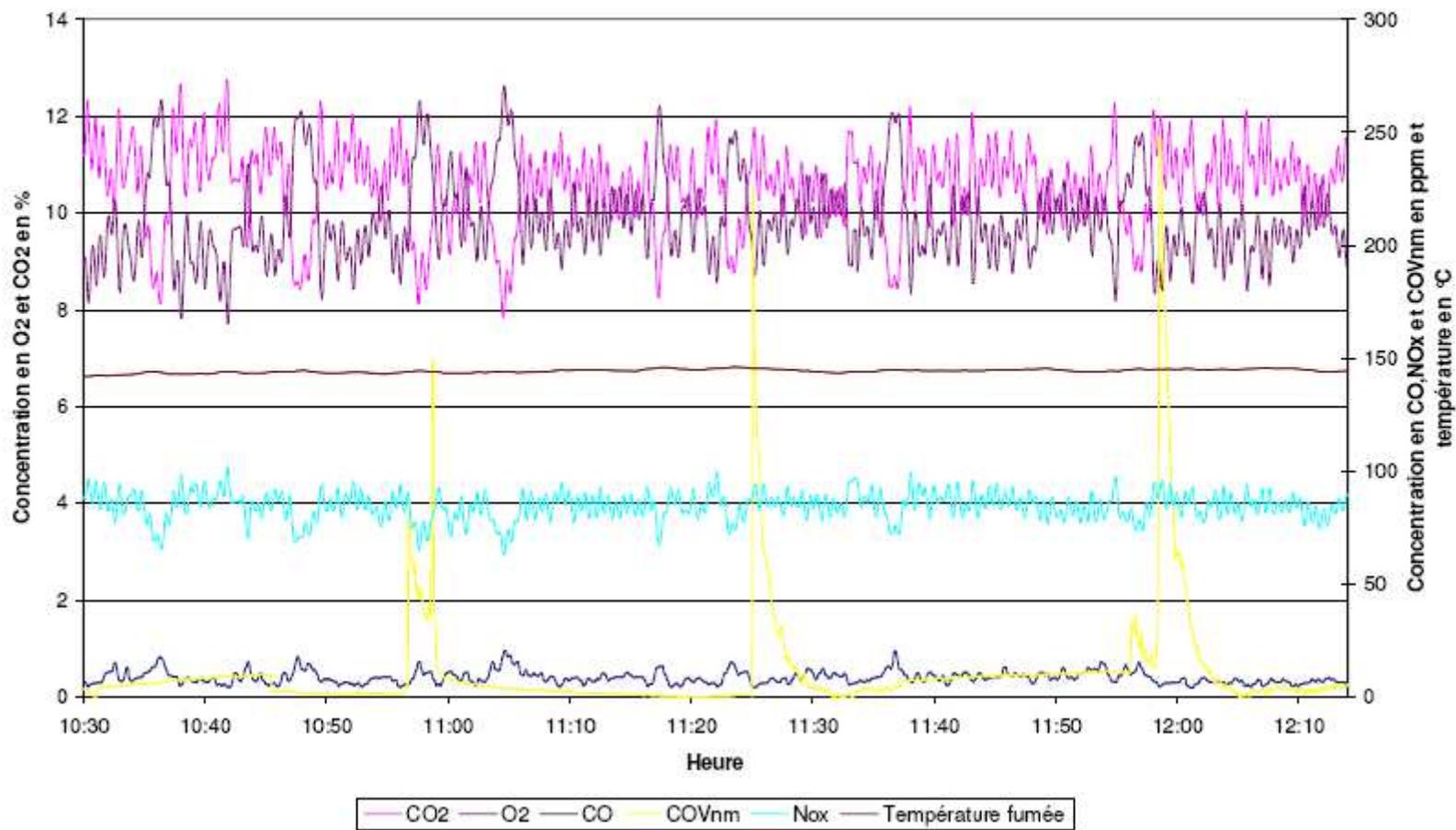
→ Cet essai tend à démontrer que le *Miscanthus* constituerait un meilleur combustible que le bois du point de vue des émissions.

V. D - 3) Analyse gazeuse tout au long de l'essai

L'analyse gazeuse a été effectuée tout au long de l'essai.



Analyse gazeuse du 18 04 07



Graphique 8: Analyse gazeuse des fumées du 18/04/2007 (Source : BUREAU VERITAS)

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

Le dioxygène est injecté à hauteur de 9% dans l'air primaire. Les courbes d'évolution de O₂ et de CO₂ sont symétriques. Cette observation permet de conclure sur le bon déroulement de la combustion pendant l'essai. Le dioxygène est correctement consommé lors de la combustion et se transforme en CO₂.

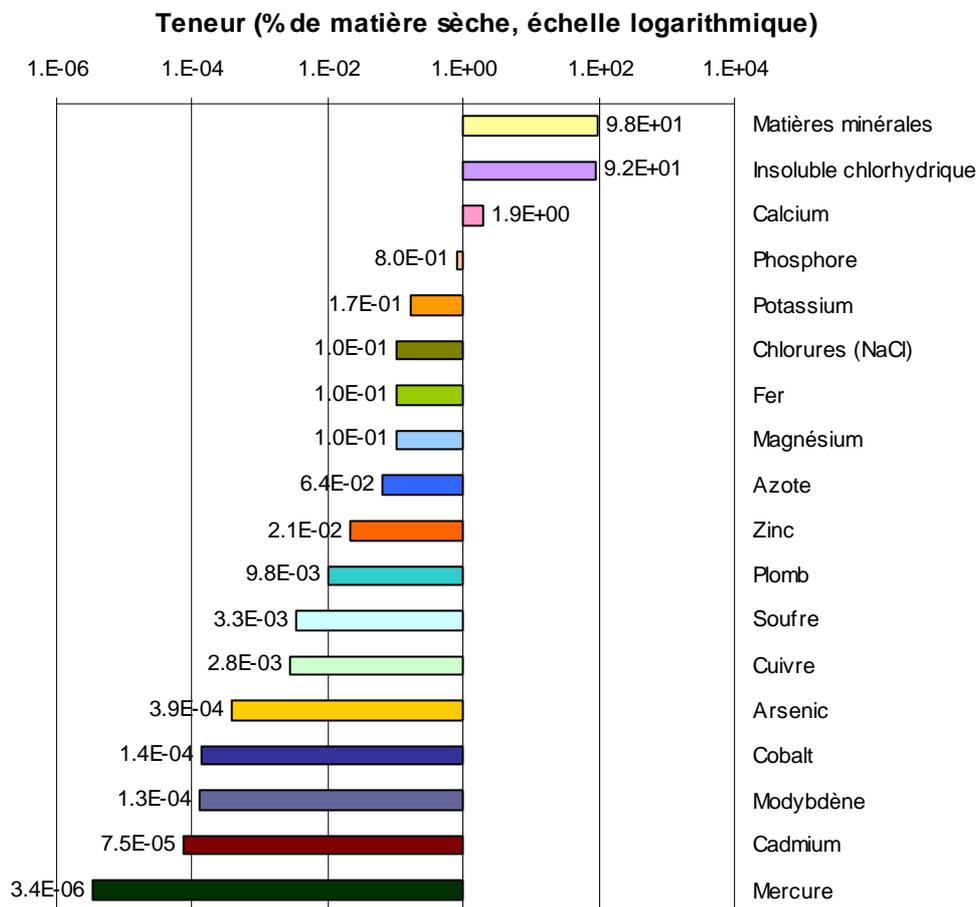
La température des fumées en sortie de chaudière reste constante, entre 151 et 154 °C. Les émissions de CO et NO_x sont constantes tout au long de l'essai (respectivement 10 ppm et 80 ppm). 3 pics de COV sont à remarquer. Ceux-ci sont de plus en plus importants au fur et à mesure que l'essai avance dans le temps (150, 230, 250 ppm). Ils apparaissent à des intervalles réguliers d'environ 30 minutes.

- M Chieze de COMPTE-R, n'a pas su expliquer ce phénomène.
- M Scabello de BUREAU VERITAS n'a également pas su définir l'origine des pics. Le changement de la solution de barbotage ne pouvait pas perturber la ligne d'analyse gazeuse.
- Aucune manipulation n'a été constatée par M Trillaut de la Chambre d'Agriculture du Lot et Garonne.

Toutefois, ces pics de COV observés ne sont pas problématiques vis-à-vis de la réglementation.

V. E. Analyse des cendres de combustion du *Miscanthus*

V. E - 1) Analyse générale



Graphique 9: Analyse des cendres issues de la combustion (Source : Laboratoire d'analyses et de contrôles INZO)

D'après les résultats du taux de matières minérales des cendres de 98%, la combustion est complète. Ceci est en contradiction avec les dires des experts constatant une forte proportion d'imbrûlés. Les teneurs en azote et en soufre totaux sont très faibles. Le taux d'azote réel est inférieur à la limite de quantification de 0.05 g/100g.

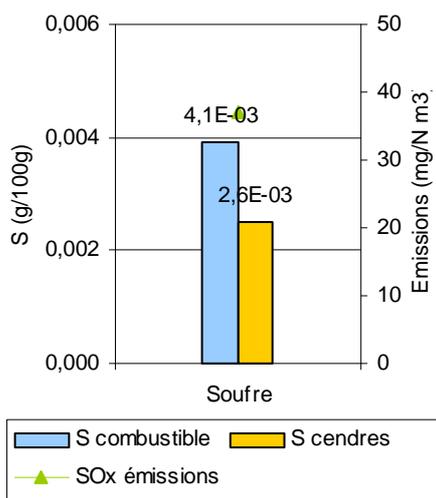
L'analyse réalisée sur les cendres issues de la combustion du *Miscanthus* concerne également des éléments lourds tels que le cuivre, le plomb, le cadmium et le mercure. Par rapport aux teneurs bibliographiques (Tableau 11) les teneurs en métaux lourds du *Miscanthus* de l'essai sont plus élevées et notamment pour le plomb (plus de 10 fois la valeur de référence).

Tableau 11: Comparaison de la teneur en éléments lourds du *Miscanthus* de l'essai avec la bibliographie (Source : SCHMIDT A. et al., 1993)

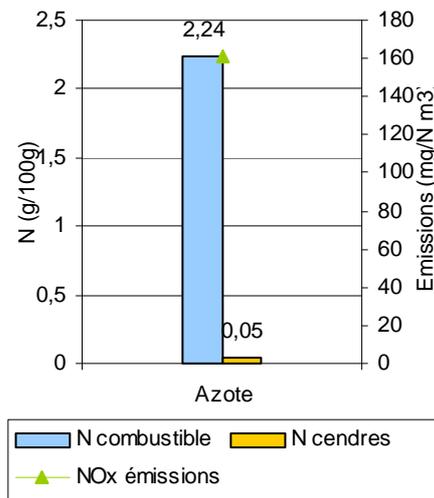
	Teneurs bibliographiques	Teneurs du <i>Miscanthus</i> de l'essai
	* 10 ⁻⁶ % MS	* 10 ⁻⁶ % MS
Cu	1910.7	2844.8
Pb	858.0	9798.2
Cd	27.3	75.1
Hg	1.0	3.4

Les teneurs bibliographiques sont issus de la base de données en ligne biobib et notamment de la source suivante : SCHMIDT A., ZSCHETZSCHE A., HANTSCH-LINHART W.; "Analyse von biogenen Brennstoffen"; TU Wien, Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik; [1993]

V. E - 2) Cas du soufre et de l'azote



Graphique 10 : Concentration en Soufre dans la matière première, et les cendres



Graphique 11 : Concentration en Azote dans la matière première, et les cendres

D'après le Graphique 10 et le Graphique 11, le soufre se concentre davantage dans les phases solides des résidus de combustion (64%) par rapport à l'azote (2%).

Contrairement au soufre, l'azote est présent en faible quantité dans les cendres. Les concentrations des émissions en NOx laissent penser que l'azote du *Miscanthus* se retrouve préférentiellement dans les émissions que dans les cendres.

VI. ELEMENTS DE DISCUSSION

VI. A. Influence de la conduite de la culture sur le peuplement de la parcelle de *Miscanthus*

VI. A - 1) Implantation

Les conditions d'implantation de la culture et la récolte des rhizomes en 2005 expliquent l'irrégularité du peuplement observé sur la parcelle : le *Miscanthus* avait été implanté grâce à un épandeur à fumier.

Cette technique ne permet pas un bon enfouissement et une bonne prise des rhizomes. Ce type d'implantation a peu à peu été abandonnée pour une plantation à l'aide d'outils spécialisés ou de planteuses à pommes de terres assurant une meilleure installation de la culture.

VI. A - 2) L'arrachage de rhizomes

L'arrachage de rhizomes a été réalisé en mars 2004 sur 5 hectares. Les informations nécessaires à l'analyse de l'état de la parcelle à l'issue de cet arrachage n'ont pas été communiquées par BICAL. Ces informations auraient pu nous permettre de savoir si l'arrachage est en partie responsable du peuplement hétérogène de la parcelle et du rendement final bas.

VI. B. Récolte du *Miscanthus*

VI. B - 1) Date de récolte du *Miscanthus*

Une limite liée aux conditions climatiques est à soulever. Contrairement à des zones plus au nord, la récolte du *Miscanthus* de février à avril est une période peu favorable dans le Sud-Ouest de la France. La portance des sols ne permet pas le passage d'outils de récolte car les sols ne gèlent pas ou peu.

Ces zones géographiques devraient envisager une récolte plus précoce du *Miscanthus*. Cependant comme il a été vu précédemment, la qualité de la biomasse pour la combustion dépend de la tardiveté de la date de récolte. Un compromis est à déterminer en fonction de la date de récolte et de la composition de la matière première pour la combustion.

VI. B - 2) Technique de récolte

La récolte en ensilage du *Miscanthus* a permis la production d'un biocombustible directement utilisable en chaudière. Le *Miscanthus* a été introduit dans la chaudière tel quel sans aucune modification, ce qui représente un avantage non négligeable. Aucune autre manipulation ou transformation supplémentaire du produit est nécessaire.

Ce type de récolte (« en vrac ») est adapté à un type de filière courte. La faible densité du produit génère des frais de transports élevés. Par ailleurs, le *Miscanthus* en vrac peut poser des problèmes

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

de stockage (gros volumes, fermentation du tas...). Par conséquent, sous cette forme déchetée, l'utilisation directe suite à la récolte est adaptée.

Les coûts de manipulation, de transport et de stockage du *Miscanthus* n'ont pas été étudiés lors de cette opération.

VI. B - 3) Estimation du rendement

La technique d'estimation du rendement par pesées différentielles était tout a fait adaptée et fiable :

- pour une opération sur le terrain ; les balances permettaient d'avoir accès aux données rapidement.
- à la pesée du matériel pour une récolte « en vrac ».

Cependant pour notre étude, toutes les bennes n'ont pas été pesées. Cette négligence n'a pas permis de déterminer précisément le rendement de la surface récoltée.

VI. B - 4) Estimation de la masse volumique

Les résultats exposés en III. E, présentent de fortes disparités.

Tout d'abord l'estimation du volume de *Miscanthus* récolté a été fait à œil. Ensuite, toutes les bennes n'ont pas été estimées : 4 bennes pour le Massey Ferguson, contre 7 bennes pour le New Holland. La différence est de 10 à 30 kg/m³ selon les cas ce qui n'est pas négligeable.

Actuellement, il existe peu de méthodes pour estimer la masse volumique d'ensilage. L'institut de l'élevage a développé 2 techniques d'estimations :

- Prélèvement à la carotteuse sur le front d'ensilage : le diamètre de la carotteuse est connu ainsi que sa profondeur.
- Equation de prédiction : équation fonction du rendement.

Une dernière technique d'estimation consiste à découper un triangle dans le tas d'ensilage et de le peser. Dans tous les cas, le tassement plus ou moins important peu faire varier la masse volumique du tas d'ensilage.

VI. C. Rendement final du Miscanthus

Le rendement final du *Miscanthus* est de 4.4t MS/ha. Normalement pour un *Miscanthus* de cet age (6 ans), le rendement récolte hiver devrait approcher 20 t MS/ha. Un certain nombre de facteurs pourraient expliquer ce rendement si bas :

- la méthode de conduite de la culture n'était peut être pas adaptée :
 - La récolte de rhizomes a peut être eu une influence sur le développement ultérieur de la culture.
 - La composition du sol pourrait ne pas être adaptée à la culture. Sur quelle base s'est reposé le choix de la parcelle avant l'implantation de la culture ?

- En avril 2006, seuls 30mm d'eau sont tombés. Cette sécheresse pourrait avoir provoqué le dessèchement des jeunes pousses et pénalisé le rendement par la suite. Une phase d'irrigation aurait pu permettre de sauver quelques pousses.
- Des erreurs de méthodologie pourraient être en cause :
 - Une analyse du sol aurait du être réalisée. Actuellement aucun relevé de composition du sol ne permet de connaître la fourniture du sol et de savoir si elle est en cause.
 - En sachant que la totalité de la parcelle n'a pas été récoltée en raison du terrain impraticable, est ce que les meilleurs rendements du *Miscanthus* ne se trouvaient pas sur cette surface ?

VI. D. Combustion du Miscanthus

Actuellement peu d'essais sur la combustion du *Miscanthus* ont été réalisés. La France est en retard par rapport à ces homologues européens.

VI. D - 1) Puissance thermique développée pendant la combustion

La puissance thermique moyenne de la chaudière n'a pas été atteinte. Ce manque provient d'un défaut d'approvisionnement en combustible : la quantité totale de combustible introduit dans le foyer, n'a pas permis de pousser la chaudière à son allure maximale.

Le dispositif d'introduction du combustible a montré ses limites. La phase de chargement du convoyeur est limitée pour le *Miscanthus*. Des adaptations sont envisageables au niveau du dispositif de transfert ou au niveau du poussoir d'introduction.

D'après M CHIEZE de la société COMPTE-R, augmenter la cadence du poussoir à 80 cycles ou rehausser les racleurs devrait permettre de délivrer la puissance maximale. Cependant, les risques d'usure sont plus importants. Une vis de transfert serait dans ce cas plus adaptée au produit qu'un convoyeur. La vis permettrait une meilleure gestion du flux de combustible vers le foyer.

VI. D - 2) Emissions de gaz

Lors du test de combustion les émissions de gaz ont été conformes à aux normes réglementaires.

L'origine des pics de COV reste cependant encore à définir. Ceux-ci pourraient être liés à la technologie de la chaudière, ou à une manipulation de la part des expérimentateurs.

D'après M CHIEZE, les pics de COV sont accompagnés d'un pic de CO. Cependant, sur le Graphique 8, il n'apparaît aucun pic de CO. M CHIEZE ajoutait qu'il avait déjà rencontré ce genre de phénomène, et qu'il ne parvenait pas en comprendre l'origine. Il remettait en cause la fiabilité des mesures et la cellule infra-rouge qui servait à la l'analyse des fumées. Les techniciens présents lors de l'expérimentation avaient remarqué la quantité de particules imbrûlées dans les multicyclones. Ces particules pourraient être en cause et provoqueraient ces pics.

VII. CONCLUSION

Ce suivi du chantier de récolte de *Miscanthus* aura permis de :

- vérifier la faisabilité de la récolte par des outils existants,
- d'acquérir et mettre à jour des références technico-économiques sur les chantiers de récolte (débits, consommations,...)
- donner des premières références en terme de productivité de *Miscanthus* dans la région

Devant le rendement très faible de la parcelle, cette opération de récolte met en avant la nécessité d'étudier plus en profondeur les besoins agronomiques du *Miscanthus* afin d'assurer régulièrement des rendements intéressants. En effet, la conduite de la culture de *Miscanthus* testé semble avoir eu une influence non négligeable sur le rendement, mais n'a pas atteint la qualité de la biomasse. La récolte très tardive a permis un lessivage des minéraux important et donc une combustion de qualité (émission gazeuses dans les normes de la réglementation). Le rendement de cette parcelle ne peut pas être relié au coût de la récolte. De fortes interrogations subsistent sur la raison d'un si faible rendement sur cette parcelle, alors que les sources bibliographiques assurent de bons rendements.

Le type de récolte (en vrac) a été adapté à la valorisation faite de cette parcelle de *Miscanthus*. Pour une filière courte, l'ensilage permet une utilisation directe du combustible. Pour des filières plus longues, la récolte en balle présentera moins de contraintes.

Néanmoins, les observations réalisées doivent être complétées par d'autres études techniques et économiques :

- une évaluation de la faisabilité météorologique de la récolte serait nécessaire à partir d'analyses fréquentielles météorologiques et de données agronomiques de portance des sols,
- bilans énergétiques
- des études de coûts de récolte : une autre récolte par ensilage permettrait de corriger les données récoltées pendant cette opération, puisque le rendement ne peut pas être relié au coût de la récolte. Une récolte en balle permettrait de récupérer des informations différentes notamment en terme de transport du combustible. Dans les deux cas, une estimation du rendement avant la récolte établira l'intérêt ou non de récolter.

Concernant l'essai de combustion :

- le mode d'introduction du combustible est susceptible d'être modifié pour s'adapter à un combustible dont la masse volumique est inférieure à celle du bois. La chaudière doit pouvoir fonctionner à son régime nominal même avec ce type de biocombustible. C'est également vers une association de différents biocombustibles (bois - *Miscanthus*) que l'on pourrait s'orienter. Ces mélanges permettraient d'optimiser la combustion et la production de chaleur tout en garantissant des émissions de CO, CO₂, NO_x ou SO₂ en accord avec les normes réglementaires.
- Dans les conditions définies pour l'essai, la situation générale d'un point de vue « rejets atmosphériques » est conforme pour tous les paramètres étudiés. Toutes les concentrations sont inférieures aux seuils réglementaires. Des expérimentations de combustion du *Miscanthus* supplémentaires permettraient d'élargir les conclusions concernant les potentialités du *Miscanthus* valorisé par combustion. Le *Miscanthus* produit-il une grande quantité d'imbrûlés ? Quels sont les paramètres de la chaudière à régler en conséquence ? Le *Miscanthus* peut-il

Opération pilote *Miscanthus*: de la récolte à la combustion

produire plus d'énergie thermique ? Ces expérimentations de combustion permettraient également de savoir si la technique de mesure de la teneur en COV est fiable. L'origine des pics de COV reste encore à définir. Une seconde opération étalée sur une plus longue période permettrait de cibler la source.

ANNEXES

Annexe 1: Résultats d'analyse de la masse des poussières inhalables dans l'air (Source : ITGA – PRYSM)

		Echantillon α	Echantillon β	Echantillon γ	Echantillon δ (blanc)
Poussières inhalables	mg	55.89 \pm 0.25	52.14 \pm 0.25	60.34 \pm 0.25	< 0.5

Annexe 2: Résultats d'analyse des rejets de SO₂ dans l'air (Source : CARSO- Laboratoire Santé et Environnement Hygiène de Lyon)

Echantillon 1 (blanc)	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
--------------------------	------------------	------------------	------------------

Evaluation de l'émission de SO₂ par chromatographie ionique sur fraction gazeuse

Volume de la solution de barbotage	ml	127	212	189	209
SO₂	mg/l	< 0.67	16	18	17
SO₂	mg/échantillon	< 0.09	3	3	4

Echantillon 5 (blanc)	Echantillon 6
--------------------------	------------------

Evaluation de l'émission de SO₂ par gravimétrie

Extrait sec à 105°C	mg	2.2	15.8
----------------------------	-----------	-----	------

Evaluation de l'émission de SO₂ par ICP/MS

Volume de la solution de barbotage	ml	54	61
---	-----------	----	----

Annexe 3: Tableau récapitulatif des résultats des émissions (Source: BUREAU VERITAS)

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne brute	Ecart type	Valeurs limites réglementaires	Avis
Indice pondéral poussières	mg/Nm3 sec à 11% d'O2	97.3	92.3	93.6	94.40	2.10	< 150	Conforme
	kg/h	0.42	0.39	0.4	0.40	0.01		
Monoxyde de carbone CO	mg/Nm3 sec à 11% d'O2	10	10	9	9.67	0.30	< 250	Conforme
	kg/h	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00		
Oxydes d'azote NO _x	mg/Nm3 sec à 11% d'O2	162	159	161	160.67	1.00	< 500	Conforme
	kg/h	0.7	0.7	0.7	0.70	0.01		
Composés Organiques Volatils non méthaniques en équivalent C	mg/Nm3 sec à 11% d'O2	6.3	5.7	12.4	8.13	3.00	< 50	Conforme
	kg/h	0.03	0.02	0.05	0.03	0.01		
Oxydes de Soufre, SO _x exprimés en SO ₂	mg/Nm3 sec à 11% d'O2	35	38.2	38.2	37.13	1.50	< 200	Conforme
	kg/h	0.15	0.16	0.16	0.16	0.01		
Vitesse d'éjection	m/s	6.3	6.3	6.4	6.33	0.03	< 6	Conforme
Débit des gaz	Nm3/h gaz sec	3847	3838	3794	3826.33	23.00		
	Nm3/h gaz humide	4249	4241	4278	4256.00	16.00		
Température	°C	142	144	144.4	143.47	1.00		
Humidité	%	9.5	9.5	11.3	10.10	0.90		
Oxygène O ₂	%	9.75	10.03	9.68	9.82	0.15		
Dioxyde de carbone CO ₂	%	10.69	10.38	10.69	10.59	0.15		

