

## Synthèse des résultats de la 1<sup>ère</sup> campagne d'essais de combustion

Résultats validés par le comité de pilotage combustion du projet composé de :

- Dominique Hantz, du Cetiat
- Yann Rogaume, de l'Enstib de Nancy
- André Le Bras, d'Arvalis Institut du Végétal
- Frédéric André, Coopédome
- Caroline Rantien, Lise Lambert et Erwan Autret, Ademe

Attention, les résultats et conclusions des essais de combustion restent à confirmer par les données de la seconde campagne. Les tests en laboratoire et dans certaines chaudières pilotes n'ont pas été réalisés dans des conditions de réglage optimales. Les enseignements de cette campagne permettront d'améliorer le protocole d'essais de la seconde campagne dans un but de conforter ces premières conclusions et répondre à certains questionnements.



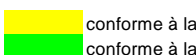
### Résultats d'analyse de la composition physico-chimique des combustibles

Les analyses physico-chimiques portent sur les 10 combustibles herbacés fabriqués et testés lors de la première campagne d'essais de combustion (granulés, miscanthus en vrac et sous-produits de la vigne) ainsi que sur des produits d'entretien du territoire et menue paille. Les résultats sont comparés aux seuils de la marque NF 444<sup>1</sup> sur les agrocombustibles haute performance et les préconisations d'Obernberger (chercheur Autrichien sur la combustion de la biomasse) pour éviter la formation excessive de polluants atmosphériques.

	PCI (kJ/kg brut)	Humidité (%)	Résultats exprimés sur produit sec									
			Cendres à 550 °C (%)	Azote (%)	Soufre total (mg/kg)	Chlore total (mg/kg)	T° de déformation (°C)	Cadmium (mg/kg)	Chrome (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Arsenic (mg/kg)
Préconisations Obernberger				<0.6	<1000	<1000		<0.0005 (sur cendres)			<0.08 (sur cendres)	
Marque NF 444 HP	>15800	<11	<5	<1.5	<2000	<2000	>1000	<0.5	<10	<40	<60	<1
Granulés bois	17 954	6	0,3	-	160	132	1311	0,04	0,5	2,1	3,9	0,0
Granulés miscanthus	16 257	10	1,8	-	507	757	855	0,05	1,1	1,6	10,4	0,1
Granulés chanvre	15 744	9	2,3	0,6	840	297	1306	0,03	1,8	2,5	4,4	0,1
Granulés paille blé	15 414	10	4,6	0,5	1900	5233	843	-	0,8	2,2	6,6	-
Granulés paille colza	15 152	10	5,7	0,7	4100	3167	1150	-	0,6	2,2	6,5	0,1
Granulés switchgrass	15 742	10	3,8	0,4	830	823	1185	-	1,9	3,1	9,1	0,1
Granulés roseau	15 507	10	5,3	0,7	1900	1233	1434	-	1,6	2,9	28,1	-
Ceps vigne	10 620	35	8,0	0,5	600	350	1201	0,12	3,2	27,8	41,1	3,3
Sarments vigne	13 580	21	5,4	0,6	720	643	1312	0,19	3,4	13,4	52,9	1,8
Menue paille	12 075	15	20,0	0,5	500	2500	1296	<	4,0	3,2	7,0	-
Fauche Voie verte	2 818	74	15,8	1,7	1333	1900	1186	<	0,5	0,6	3,6	<
Lande	11 553	40	2,9	1,5	1400	987	1106					



non conforme à la norme (+de 10%)  
conforme à la norme à ±10%



conforme à la norme à plus de 10%, ne respecte pas les préconisations  
conforme à la norme (+de 10%), respecte les préconisations d'Obernberger

Parmi les 8 granulés testés, les granulés de bois sont les seuls qui conviennent parfaitement à une valorisation énergétique par combustion. Ensuite, les granulés de miscanthus, switchgrass et chanvre

<sup>1</sup> Marque concernant les granulés d'origine ligneuse et les granulés d'origine herbacée et/ou fruitière non traités chimiquement, basée sur la norme XP CEN/TS 14961, gérée par le FCBA et certifiée par l'Afnor.

de part leurs teneurs en cendre, soufre, chlore et minéraux inférieurs aux recommandations d'Obernberger ou seuils de la marque NF 444 (elles sont toutefois largement supérieures à celles des granulés de bois), pourraient être compatibles avec un usage en combustion. La combustion du miscanthus risque toutefois d'entraîner une formation de mâchefers du fait de la température basse de déformation de ses cendres.

Les granulés de roseaux, pailles de blé et de colza présentent des teneurs très importantes en cendres, azote, chlore et soufre. Leur combustion risque d'entraîner des émissions élevées en NOx et de SO<sub>2</sub> et la corrosion des tubages de la chaudière.

Les teneurs en cendres des ceps et sarments de vigne sont parmi les plus élevées de la campagne d'essais. Il contiennent des teneurs plus élevées en cuivre, zinc et surtout arsenic pour lequel les concentrations sont supérieures aux valeurs de la marque NF 444.

Les teneurs élevées en cendres (20%) et chlore de la menue paille rendent le sous-produit analysé incompatible avec les chaudières.

La fauche de voies vertes contient trop d'azote et d'eau pour envisager une valorisation en combustion. La lande a un PCI intéressant pour envisager une combustion mais sa teneur élevée en azote limite les perspectives de valorisation de cette biomasse pure en combustion.



## **Tests de combustion en laboratoire : résultats assez satisfaisants pour les cultures énergétiques**

Les 9 combustibles sont testés dans une même chaudière polycombustible de marque Hargassner, en conditions contrôlées. Contrairement aux attentes du projet, les tests réalisés au CSTB Nantes n'ont pas été réalisés dans des conditions optimales (la chaudière doit être maintenue en régime stable et le réglage de la combustion doit être amélioré). La seconde campagne va permettre de mieux répondre aux questionnements et de confirmer ces premiers résultats.

Les performances de combustion des combustibles sont comparées à celles du bois et aux valeurs de la norme NF EN 303.5<sup>2</sup> (classe 3 actuelle et 2 nouvelles classes en cours de validation), à l'arrêté de 1997 concernant les installations de puissance supérieure à 2MW pour le soufre et à une exigence autrichienne pour les NOx. Les résultats des tests de combustion sont présentés dans le tableau p5.

Le granulé bois respecte toutes les valeurs de la norme sur les performances de chaudière et les émissions atmosphériques.

Les performances de combustion (rendement de la chaudière, émissions de CO, COV) et émissions de NOx du granulés de miscanthus sont comparables à celles du bois. Les émissions de SO<sub>2</sub> et de poussières sont inférieures aux classes les plus restrictives ou recommandations. Les émissions de HCl sont peu élevées. La seule contrainte rencontrée avec ce combustible testé en laboratoire est la formation de mâchefers. Les émissions liées au miscanthus en vrac sont plus élevées au niveau du CO et des poussières, liées au caractère hétérogène, plus volumineux et humide du combustible.

Les granulés de chanvre et de switchgrass présentent également de bons résultats de combustion et d'émissions : émissions de NOx, de CO et COV inférieures aux seuils des normes les plus restrictives, émissions d'HCl basses sauf pour un point de mesure.

Les émissions d'imbrûlés deviennent élevées pour tous les essais avec les granulés de paille de blé et colza et peuvent s'expliquer par des excès d'air importants (réglage de la chaudière à optimiser).

---

<sup>2</sup> Norme européenne s'appliquant aux chaudières ayant une puissance utile nominale inférieure ou égale à 300 kW, à alimentation manuelle ou automatique, destinées à brûler des combustibles solides (biomasse et fossiles).

Les émissions de NOx sont inférieures aux spécificités autrichiennes. Les émissions de chlore sont élevées pour ces deux combustibles. Les émissions de soufre sont correctes pour la paille de colza mais dépassent la valeur seuil de l'arrêté de 1997 pour le blé. La paille de colza, qui contient 2 fois plus de soufre que le blé devrait - a priori - entraîner des émissions de soufre plus élevées.

Les émissions de NOx du roseau restent inférieures aux spécificités autrichiennes. Les émissions de SO<sub>2</sub>, proches de la valeur de la norme et les émissions élevées d'HCl risquent d'entraîner des problèmes de corrosion du matériel.

Les performances de combustion des sarments et ceps de vigne sont mauvaises, ce qui s'explique par un combustible trop humide et de dimension très hétérogène ce qui a entraîné des problèmes de bourrage de l'alimentation. Les émissions en NOx et SO<sub>2</sub> restent inférieures aux valeurs de la norme. Les émissions élevées de poussières s'expliquent par la présence de fines et poussières dans le combustible ainsi que la mauvaise qualité de la combustion. Les émissions d'éléments traces métalliques sont similaires à celles du bois pour le Pb et Zn et 3 fois supérieures au bois pour le Cu et As, mais restent faibles.



## Une pollution plus importante en condition réelle qu'en laboratoire

Les granulés de bois, miscanthus, switchgrass, blé et roseau ont également été testés en conditions réelles dans des chaudières de puissance de 10 à 450 kW pour mesurer l'influence de la taille et du réglage des chaudières sur les performances de combustion et les émissions atmosphériques. Un professionnel est intervenu au passage du combustible témoin (bois) au biocombustible pour adapter les réglages de la chaudière au nouveau combustible.

Pour beaucoup d'essais les chaudières étaient mieux réglées dans le cas du combustible herbacé que dans le cas du bois car l'intervention d'un professionnel a été programmée au changement de combustible. Cependant, en dépit de cette intervention, les chaudières étaient globalement mal réglées. Les émissions de CO et de COV ou poussières dépassent les nouvelles valeurs seuils pour la moitié des chaudières (cf.p5). La plupart des chaudières peuvent être mieux réglées pour ces essais ce qui devrait sensiblement améliorer les résultats.

Les résultats des essais en conditions réelles confirment les résultats des tests en laboratoire au niveau du rendement et des émissions de NOx : les résultats des agrogranulés sont conformes aux valeurs des normes et comparables à ceux obtenus en laboratoire.

Sur les autres paramètres, les résultats sont plus contrastés :

Pour le miscanthus, les résultats d'émissions d'HCl sont beaucoup plus élevés et hétérogènes sur les tests en chaudière pilote (de 9 à 40 mg/Nm<sup>3</sup> pour le même combustible, dont la teneur en chlore est inférieure à 0.1%). Les émissions de poussières du miscanthus sont également beaucoup plus élevées dans les sites pilotes qu'en laboratoire, à des niveaux parfois inacceptables (largement supérieurs à 150 mg/Nm<sup>3</sup>).

Les résultats des tests sur le roseau sont aussi mauvais que ceux du témoin bois utilisé sur ce même site. Un problème important de réglage de la chaudière en est la cause.

Les résultats des tests réalisés avec la paille de blé sont plus mauvais que ceux réalisés en laboratoire au niveau des émissions de CO et de soufre et peuvent être liés à la technologie et aux réglages de la chaudière et à son encrassement.

Les résultats de combustion des ceps et sarments de vigne confirment les résultats des tests en laboratoire.



## Conclusions provisoires sur les résultats

### Conclusion provisoire par paramètre

Dans la chaudière installée au laboratoire, les émissions liées aux imbrûlés (CO et COV) restent inférieures à la norme actuelle et aux nouvelles classes proposées. Dans les chaudières en conditions réelles de fonctionnement, le respect des seuils d'émissions est plus difficile à atteindre, que ce soit pour les témoins bois que les granulés, ce qui montre que les réglages de la chaudière ont un rôle important et sont à améliorer.

Les émissions de NOx sont les seules que l'on arrive à corréliser à la composition de la biomasse, aussi bien pour les tests en laboratoire qu'en chaudière pilote. Elles restent peu élevées en lien avec la teneur peu élevée en azote dans les combustibles testés (maxi 0,7% azote).

Les émissions de SO<sub>2</sub> et d'HCl sont plus difficiles à corréliser aux teneurs en soufre et chlore des combustibles. Pour des concentrations en soufre et chlore dans le combustible inférieures aux seuils de la norme NF 444, on retrouve parfois des émissions supérieures au seuil de l'arrêté de 1997 (200 mg/Nm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>) ou élevées en HCl (jusqu'à 40mg/m<sup>3</sup>). De même, en ayant des teneurs en chlore dans le combustible deux fois plus basses que le seuil de la norme NF 444, il est possible d'atteindre des émissions en HCl 3 à 4 fois trop élevée pour éviter les risques de corrosion. Le respect des seuils de la norme NF 444 semble insuffisant pour éviter des émissions importantes en chlore et les conditions de combustion (technologie de chaudière et réglages) semblent intervenir fortement dans les émissions d'HCl et de SO<sub>2</sub>.

### Conclusions provisoires par combustible et recommandation

Parmi les combustibles testés, les granulés de bois arrive en tête des meilleurs combustibles ; ensuite, les granulés de miscanthus, switchgrass et chanvre apparaissent comme des candidats potentiels à une utilisation en combustion, sous réserve de recourir impérativement à des installations adaptées et bien réglées pour éviter d'endommager le matériel :

- la formation de mâchefers est systématique et importante. La chaudière doit être équipée d'un système de grilles mobiles et/ ou d'un racleur pour éviter de perturber le déroulement de la combustion et d'endommager le matériel.
- même en respectant les recommandations d'Obernberger, deux fois plus basses que les seuils de la norme NF 444, certains combustibles entraînent la formation d'HCl relativement importantes. Pour éviter la corrosion du conduit de cheminée, il est indispensable d'utiliser un tubage céramique et de régler la chaudière de manière à maintenir une température de fumée élevée et éviter la condensation des fumées.

La combustion de granulés de paille de blé, colza et roseau entraînent l'émission plus importante d'HCl et de SO<sub>2</sub>. La possibilité de leur utilisation en chaudière pourrait être remise en question si les prochains essais confirment ces résultats.

La combustion de ceps et sarments de vigne dans de telles conditions (produit humide et mal broyé) est déconseillée. Un séchage et meilleur broyage sont indispensables pour envisager une utilisation du produit en chaudière bois.

Composition du combustible						Performances de combustion et émissions atmosphériques (exprimées sur gaz sec à 10% O2)											
	Azote (%MS)	Soufre (mg/kg)	Chlore (mg/kg)	Taux de cendres (%)	T <sup>Déf</sup> (°C)			Rendement Indirect	CO (mg/Nm3)	NOx (mg/Nm3)	SO2 (mg/Nm3)	HCl (mg/m3)	Poussières (mg/m3)	Taux de cendres	Mâchefers	Facteur d'air (λ)	T fumées (°C)
Norme NF 444 HP	>1.5	>2000	>2000	>5	>1000	Références NF EN 303.5 ou autre		CI 3 : 76,6	>CI 3 : 3000	>600	>200	> 10	> CI 3: 150	5%	75-100: ++++	λ>2,5	>120
Préconisations	>0.6	>1000	>1000	> 10% 5	< CI 3			>CI 4 : 1000	> 10% 600	> 10% 200	> 10% 10	> CI 4 : 100	< 5%	50<75% : +++	1<λ<2,5	>120	
	<0.6	<1000	<1000	<5	>1000			>CI 5 : 500	< 10% 600	< 10% 200	< 10% 10	> CI 5 : 60	< 60	25<50% : ++	<25% : +		
Gran. BOIS	<0,38	411	690	1,8	>1466	Labo	N	85	278	363	5	1,3	24	0,6%	++	2,5	157
							R	84	450	357	7	3,9		0,4%		3,3	142
Gran. MISCANTHUS Coopédom	0,1	553	757	1,9	900	Labo	N	88	426	166	39	4,6	35	1,6%	+++	1,8	163
							R	88	564	177	21	7,2		0,9%		2,3	136
						450 kW	N	87	887	110	46	9,1	238	0,6%	+++	2,0	163
							R	89	1191	117	45	37,0	234	0,6%		1,7	152
						200 kW	N	86	102	227	23	35,0	49	1,2%	++++	1,7	202
							R	87	223	204	30	40,7	125	1,2%		1,6	186
Gran. MISCANTHUS autre	0,3	290	643	2,2	815	Labo	N	88	92	157	26	0,6	56	1,9%	++++	1,9	162
							R	89	297	163	17	0,4		1,8%		2,3	129
						20 kW	N	93	173	198	55	6,3	99	-	+	1,4	110
							R	94	84	212	47	6,4	76	-		1,4	96
MISCANTHUS Vrac	0,3	195	547	3,9	885	Labo	N	77	1520	219	7	0,8	83	2,6%	+++	4,5	144
							R	87	473	200	28	0,4		2,2%		2,3	136
MISCANTHUS Vrac	<0,3	560	1500	2,2	868	300kW	N	89	153	245	37	4	226	2,0%	+		
							R	89	638	263	47	9,9	195				
Gran. ROSEAU	0,7	1 900	1233,3	5,3	1434	Labo	N	88	395	378	175	49,2	53	4,3%	-	1,9	156
							R	86	534	403	120	5,6		5,4%		3,0	118
						25 kW	N	55	2552	625	-		++	5,0%	-	8,8	119
							R	56	5872	574	-		++	5,5%		15,1	100
Gran. SWITCHGRASS	0,4	830	823	3,8	1 185	Labo	N	86	440	290	65	0,8	36	3,7%	+++	2,1	156
							R	85	914	307	41	29,0		3,9%		3,7	112
						60 kW		73	133	326	22		+	2,3%	++	4,3	177
Gran. CHANVRE	0,6	840	297	2,3	1306	Labo	N	86	549	328	61	1,1	66	1,5%	-	2,0	167
							R	86	627	339	42	3,9		2,7%		2,4	142
Gran. P. COLZA	0,7	4100	3167	5,7	1150	Labo	N					24,6		2,7%	-		
							R	86	1869	316	46	45,4		2,8%		2,4	130
Gran. P. BLE	0,5	1 900	5 233	4,6	843	Labo	N	81	1441	327	64	26,8	141	1,7%	++	3,2	148
							R	87	1505	355	48	23,1		8,2%		2,5	119
						10 kW	N	74	> 5547	136	197		+++	0,7%	++	4,0	179
							R	74	> 5548	147	907		+++	1,8%		4,6	171
SARMENTS VIGNE Vrac	0,6	720	643	5,4	1312	Labo	N	61	9832	405	41	0,8	13	4,1%	-	13,0	89
							R	55	4871	304	100	1,7		8,0%		25,2	70
CEPS VIGNE Vrac	0,5	600	350	8,0	1 201	Labo	N	73	16838	263	12	2,7	325	4,1%	-	4,5	138
							R	55	19684	258	131	7,7		1,8%		14,7	104
						150 kW	N	87	2170	442	24	1,2	298	2,0%	-	2,7	117
							R	79	5547	446	22	1,6	590	2,0%		6,3	96