



Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Campagne 2014
LECES - INDDIGO

Sommaire

- Objectif de la campagne
- Aspects énergétiques
- Aspects environnementaux
 - *Cendres*
 - *Combustible*
 - *Emissions atmosphérique*
- Bilan national
- Conclusions

Objectif



Objectif

L'étude a pour objectif de préciser les connaissances actuelles sur les émissions de chaufferies biomasse :

Réalisation de mesures sur une dizaine de chaufferies :

- Bilan énergétique
- Caractérisation des combustibles
- Caractérisation des cendres
- Caractérisation des émissions atmosphériques

Synthèse par rapport aux travaux précédents :

- Evaluation réalisées en 2003, 2007 et 2009
- Comparaison des facteurs d'émission du CITEPA
- Identifier les anomalies et proposer des améliorations

Evaluer les performances des chaufferies au regard de la réglementation

Mesures réalisées

- Combustible
 - *PCI, taux de cendres, granulométrie, humidité, éléments majeurs, métaux, PCB indicateurs, PCP, organohalogénés de type pesticide*
- Cendres
 - *Analyse séparée des cendres sous foyer et des fines d'épuration*
 - *Humidité, granulométrie, valeurs agronomiques, métaux, PCDD/F, PCB, HAP, radioéléments*
- Emissions atmosphériques
 - *Poussières, particules fines*
 - *Gaz CO, CO₂, O₂, NO_x, COV, CH₄*
 - *Aérosols : HF, HCl, SO₂*
 - *métaux*
 - *POPS : PCDD/F, HAP, HCB, PCB*
 - *Divers : levoglucosan, carbone élémentaire et total*

Caractéristiques des chaudières étudiées

Ville	Mise en service	Puissance bois MW	Combustible	Régime ICPE actuel	Régime ICPE futur
Site 1	03/2011	7,6 (2 x 3,8)	PF : 55 % PBFV : 29 % Ecorces : 17 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
Site 2	12/2008	7,6 (2 x 3,8)	PF : 95 % PBFV : 5 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
Site 3	07/2012	15 (2 x 7,50)	PF : 93 % « Plaquettes urbaines » : 7 %	2910-A Autorisation Zone PPA	2910-B (ou 2910-A si SSD) Autorisation Zone PPA
Site 4	10/2012	1,95	PF : 98% Broyat Palettes site : 2 %	Non classée	2910-B Enregistrement ou Non classée (si SSD)
Site 5	11/2012	1,8	PF : 70% « Bois industriel » : 30 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
Site 6	11/2011	0,8	PF : 30% PBFV : 70 %	Non classée	2910-B Enregistrement ou Non classée (si SSD)
Site 7	11/2012	2,1	PF : 33% PBFV : 67 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
Site 8	07/2013	0,35	PF : 100 %	Non classée	Non classée
Site 9	10/2011	3,3	PF : 45 % PBFV : 55 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
Site 10	2012	5,3	PF : 92,5% PBFV : 7,5%	2910-A Autorisation	2910-B (ou 2910-A si SSD) Autorisation

Spécificité des chaufferies

- 6 sites sont équipés de filtres à manches
- 3 sites sont équipés d'électrofiltres
- 1 site n'est équipé que d'un multi-cyclone (site 6)
- 1 site est équipé d'un système DENOX-SNCR (site 3),
- 1 site est doté d'une chaudière Bas-NOx (site 4)
- 1 site est équipé d'une condensation des fumées (site 10)

- Sur la quasi-totalité des sites, les cendres de multi-cyclone sont recueillies avec les cendres sous foyer

Aspects énergétiques

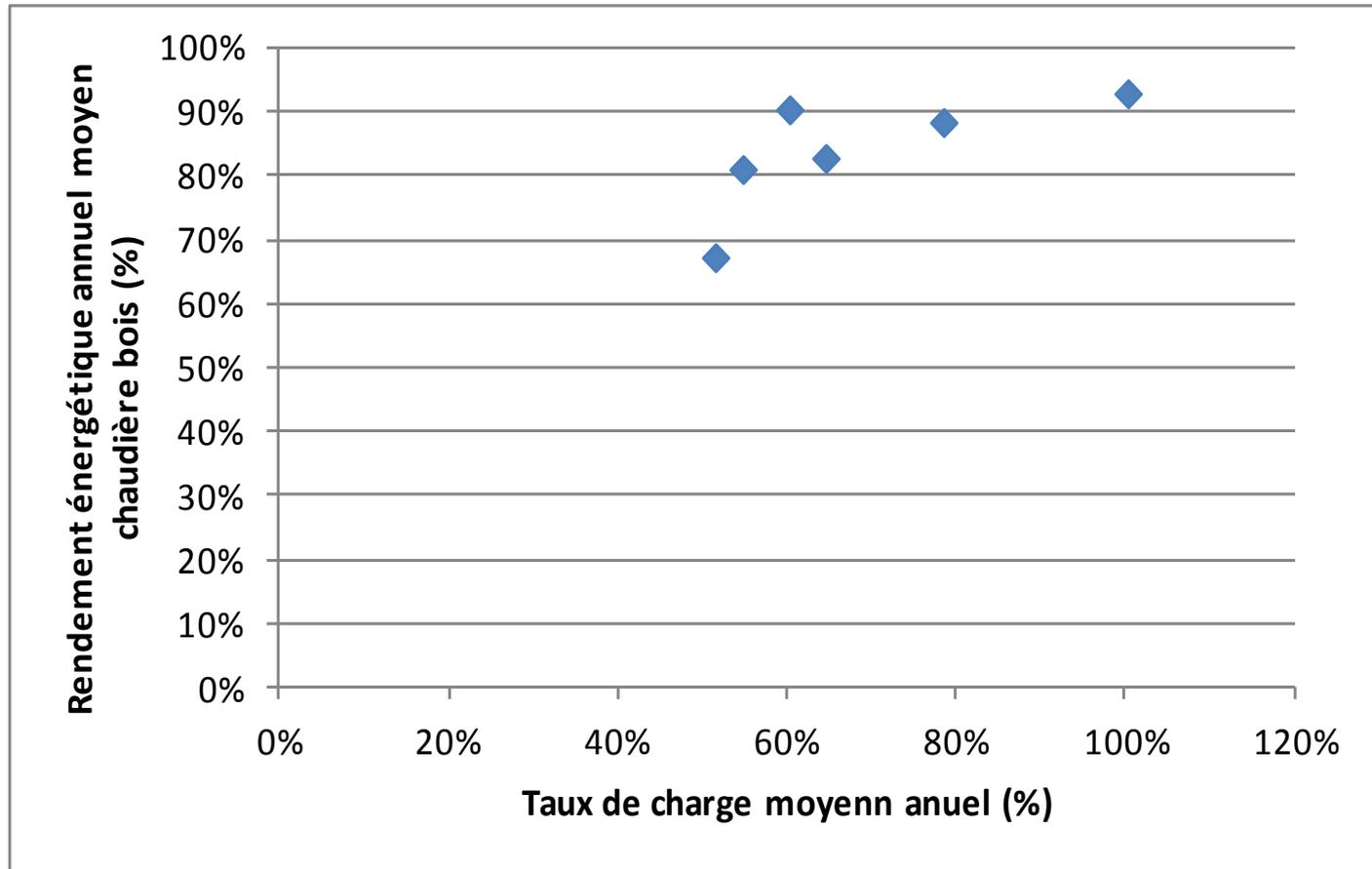


Bilans énergétiques instantanés

Paramètres mesurés	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10
Puissance nominale	kW	3800	3800	7500	1950	1800	800	2100	350	3300	4500
Puissance moyenne	kW	2541	3669	6252	1671	1785	240	817	85	2385	4660
Rendement sur PCI	%	91	86	91	88	90	89	80	84	91	94
Taux de charge	%	67	97	83	86	99	30	39	24	72	104

- Bons rendements sauf deux chaudières
- L'installation du site 10 équipée d'une condensation a un excellent rendement (*légèrement sous-estimé*)

Bilan énergétique sur une saison de chauffe



Rendement moyen annuel de 79 % mais forte disparité

Le rendement s'améliore avec le taux de charge moyen annuel

Aspects environnementaux - combustible



Analyse des métaux dans les combustibles

Paramètre	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêté (1)
Combustible majoritaire	PF	PF	PF	PF	PF	PBFV	PBFV	PF	PBFV	PF			
Cr	1,00	0,29	2,03	1,68	1,47	1,38	3,43	3,15	2,59	0,74	1,58	1,78	30
Cu	7,0	0,6	6,5	2,8	4,1	8,5	10,8	8,1	4,9	4,0	5,72	5,72	30
Zn	41,1	13,4	42,3	10,8	18,6	39,7	43,6	25,5	32,3	31,7	32,0	29,9	200
As	0,24	0,09	0,52	2,72	0,31	0,55	1,19	2,23	1,35	0,09	0,53	0,93	4
Cd	0,12	<0,025	0,18	0,18	0,16	0,13	0,23	0,15	0,08	0,16	0,15	0,14	5
Pb	16,0	0,6	5,0	1,9	1,1	26,8	10,2	6,0	9,9	0,7	5,51	7,83	50
Hg	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	0,042	0,028	<0,025	<0,025	0,025	0,027	0,2

(1) : Arrêté Enregistrement

- Les analyses sont représentatives du combustible lors des essais, pas représentative du mix moyen annuel
- Présence de Zn, Pb et Cu sur quelques sites
- Teneur anormale en Pb sur une chaufferie

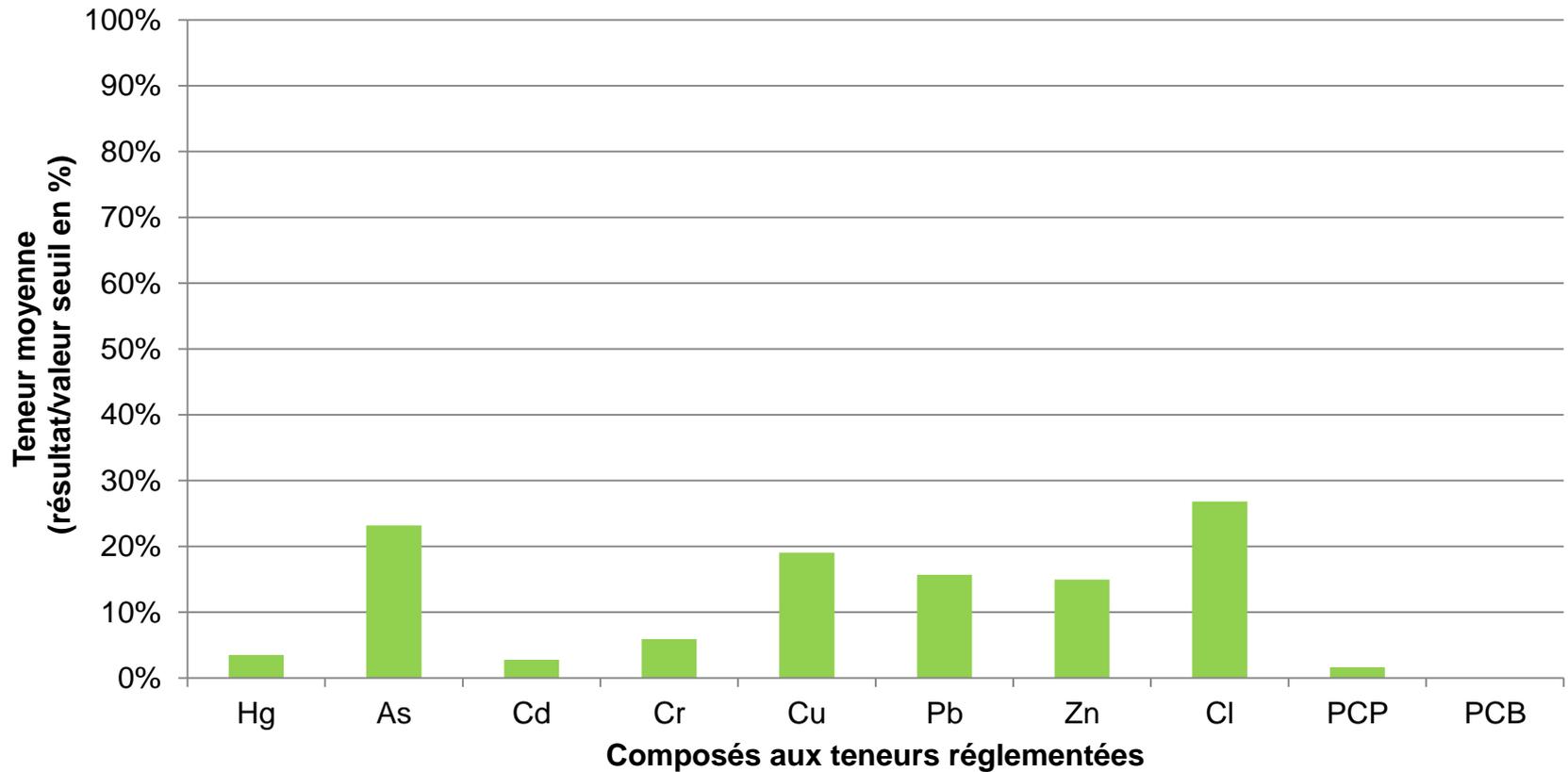
Principales analyses réalisées sur le combustible

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Méd.	Moy.	VL Arrêté (1)
Comb.		PF	PF	PF	PF	PF	PBFV	PBFV	PF	PBFV	PF			
PCI	MJ/kg MB	9,2	8,8	9,7	13,6	11,8	14,7	10,9	13,1	10,9	10,4	10,9	11,3	
Cendres	% MB	2,9	1,4	1,1	0,7	0,2	1,2	1,3	3,8	4,1	1,2	1,3	1,8	
H2O	% MB	44,0	45,4	40,7	22,6	33,1	19,0	37,8	28,4	46,9	40,0	38,9	35,8	
N	mg/kg MS	1,1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,5	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,3	0,4	
H	mg/kg MS	6,1	7,1	6,0	5,9	6,0	5,8	6,5	6,1	6,2	5,9	6,0	6,2	
C	mg/kg MS	49,3	49,9	49,5	50,1	50,2	49,9	50,8	51,1	50,1	50,5	50,1	50,1	
Cl	mg/kg MS	263	394	130	<20	39	141	154	285	951	55	148	243	900
PCB	mg/kg MS	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0,07	0,07	2
PCP	mg/kg MS	<0,025	<0,025	<0,025	0,42	<0,030	<0,025	0,08	<0,025	<0,025	<0,027	0,025	0,070	3

(1) : Arrêté Enregistrement

- L'humidité est très variable (de 22,6 % à 46,9 %)
- 2 chaufferies ont des éléments dépassant 100 mm
- Il n'a pas été détecté de PCB, PCP, ni d'organohalogénés

Analyse des combustibles par rapport aux seuils de des combustibles b(v) de l'arrêté Enregistrement



- Les seuils définis dans l'arrêté type enregistrement sont respectés

Aspects environnementaux Cendres



Définition

- Cendres sous foyer
 - *Cendres recueillies sous le foyer avec les cendres de multi-cyclone sauf sur 2 sites où ce sont uniquement les cendres provenant du foyer (sites 6 et 8)*
- Cendres volantes
 - *Cendres recueillies sous les filtres à manches ou électrofiltres sauf un site où ce sont les cendres du multi-cyclone (site 6)*

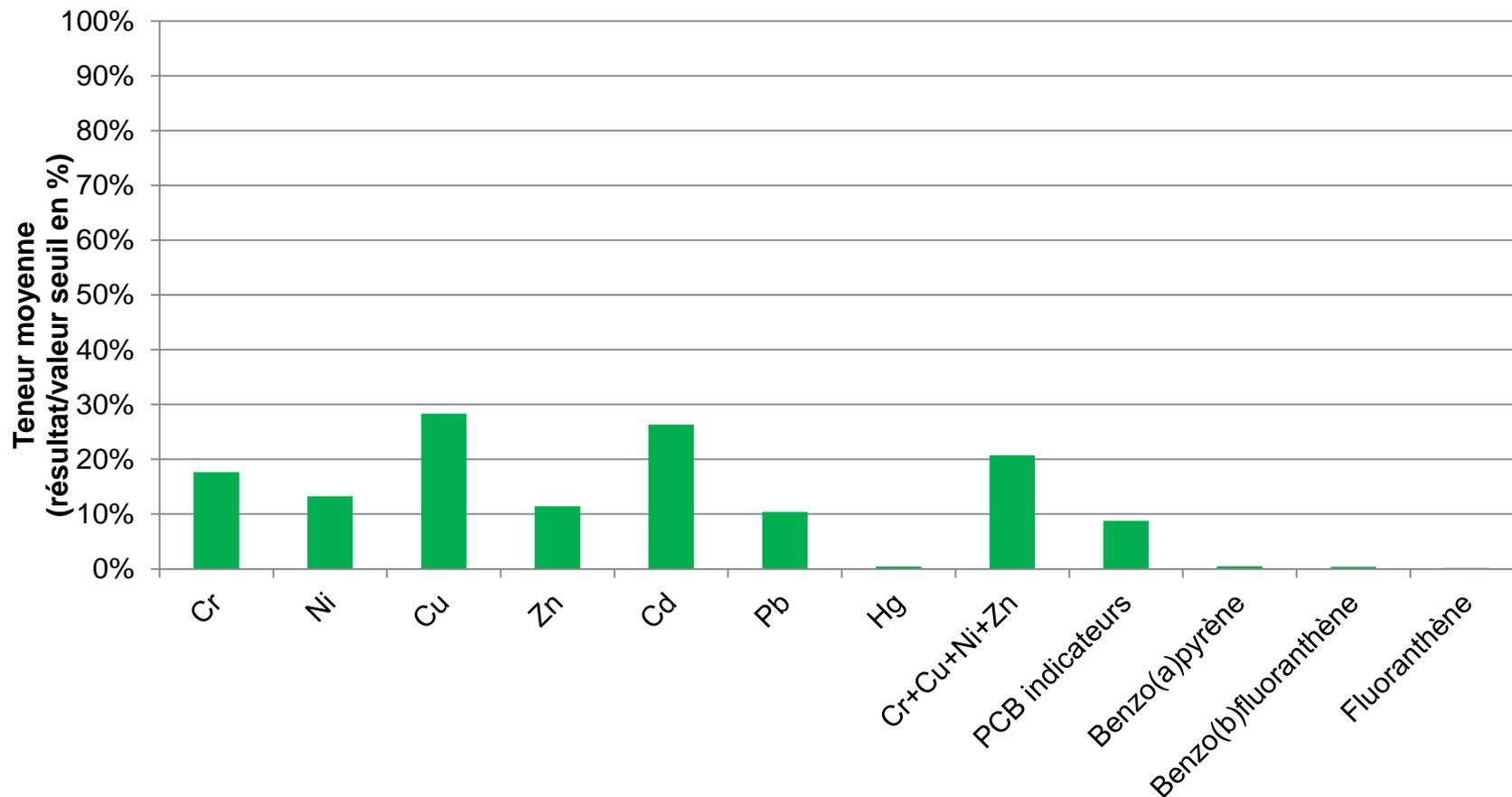
Répartition massique des cendres

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10
Cendres sous foyer		F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F	F+MC	F	F+MC	F+MC
Taux de cendre	%	1,42	2,58	NC	5,27	2,44	1,99	1,68	0,85	1,34	1,42
Cendres volantes		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM
Taux de cendre	%	0,073	0,335	NC	0,119	0,052	0,046	0,082	0,121	0,051	0,073
Ratio Cendres sous foyer / Total	%	95,1	88,5	-	97,8	97,9	97,7	95,4	87,5	96,3	95,1

Cendres sous foyer : environ 1,4 % du combustible

Cendres volantes : environ 5 % du total des cendres

Analyse des cendres sous foyer par rapport aux seuils permettant l'épandage



En moyenne, les seuils n'imposent pas de restriction à l'épandage

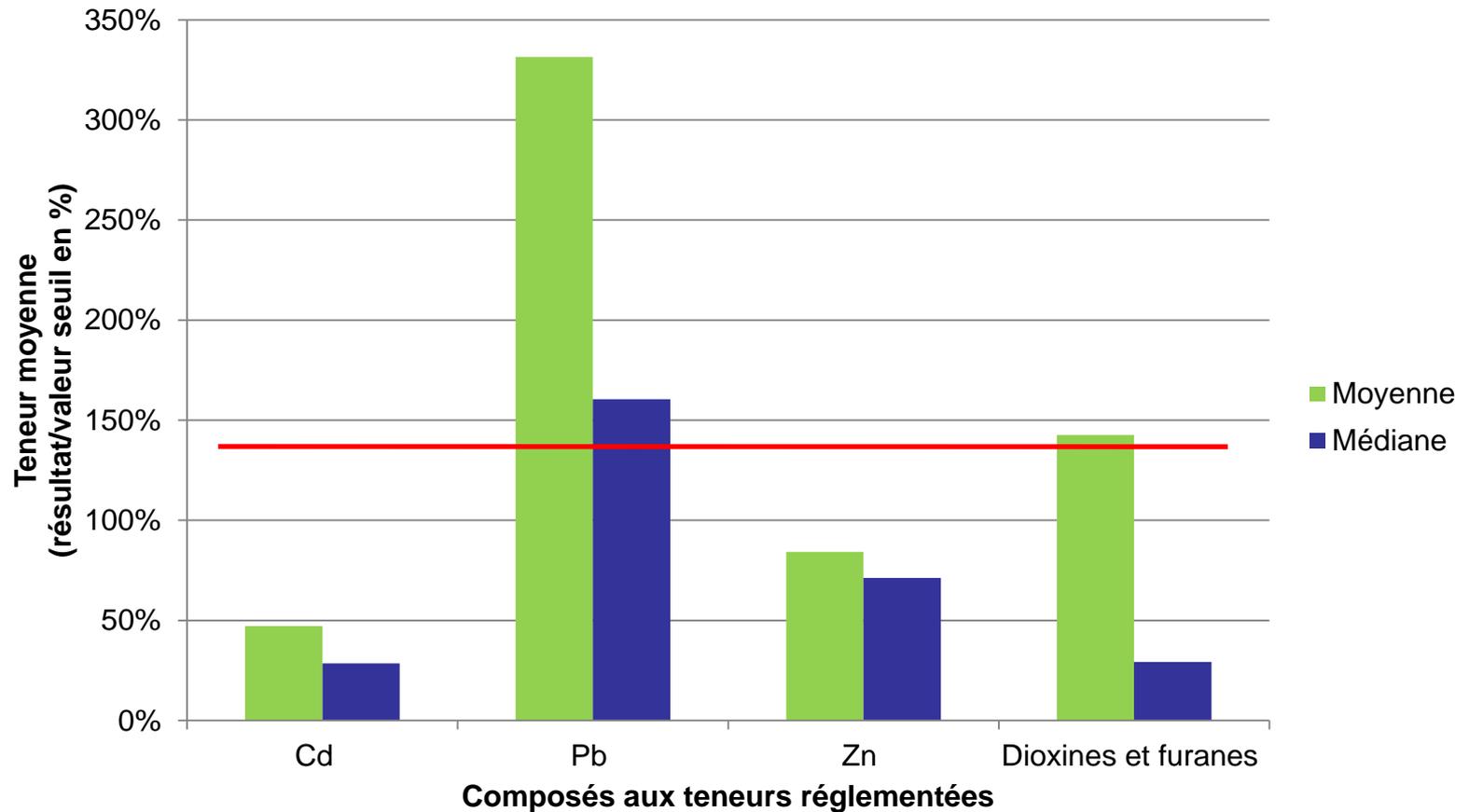
Valorisation des cendres sous foyer

- Distinction au niveau de la réglementation ICPE entre les cendres volantes et les cendres sous foyer
- Dans la pratique, les cendres du multi-cyclone sont collectées avec les cendres sous foyer
- Le mélange de ces deux types de cendre est compatible avec les seuils fixés pour épandage

Analyse des cendres volantes

- Concentrations parfois élevées en métaux (Zn et Pb principalement) et PCDD/F
- Ces cendres ne peuvent être valorisées en filière d'épandage
- Certaines chaufferies utilisent du broyat d'emballage et pourraient passer à Enregistrement :
 - *Il pourrait y avoir sur certains sites des dépassements des teneurs en Pb et PCDD/F des cendres volantes issues de combustibles de type b(v)*

Cendres volantes : Comparaison aux seuils de l'arrêté PG Enregistrement



- Valeurs moyennes et médianes sur les 10 chaufferies

Radioactivité des cendres

	Para mètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Med.	Moy.
Cendres sous foyer			F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F	F+MC	F	F+MC	F+MC		
Radio activité globale	R α	Bq/kg	-	110	115	115	80	190	100	140	110	125	115	121
	R β	Bq/kg	-	1300	1740	1300	900	2900	1100	2000	1300	1200	1300	1527
Radio activité naturelle	Cs 137	Bq/kg	14,6	9,1	52	7,1	2,4	50	13	6,3	5,6	37	11	20
Cendres volantes			FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM		
Radio activité globale	R α	Bq/kg	650	2430	1260	700	1600	280	950	1260	2400	1360	1260	1289
	R β	Bq/kg	4900	15000	14400	6000	12400	2700	9000	5400	22000	10000	9500	10180
Radio activité artificielle	Cs 137	Bq/kg	102	160	370	77	80	86	340	11	130	420	116	178

La radioactivité des cendres volantes est environ 10 fois supérieure à la radioactivité des cendres sous foyer

Aspects environnementaux

Emissions atmosphériques



Emissions - poussières

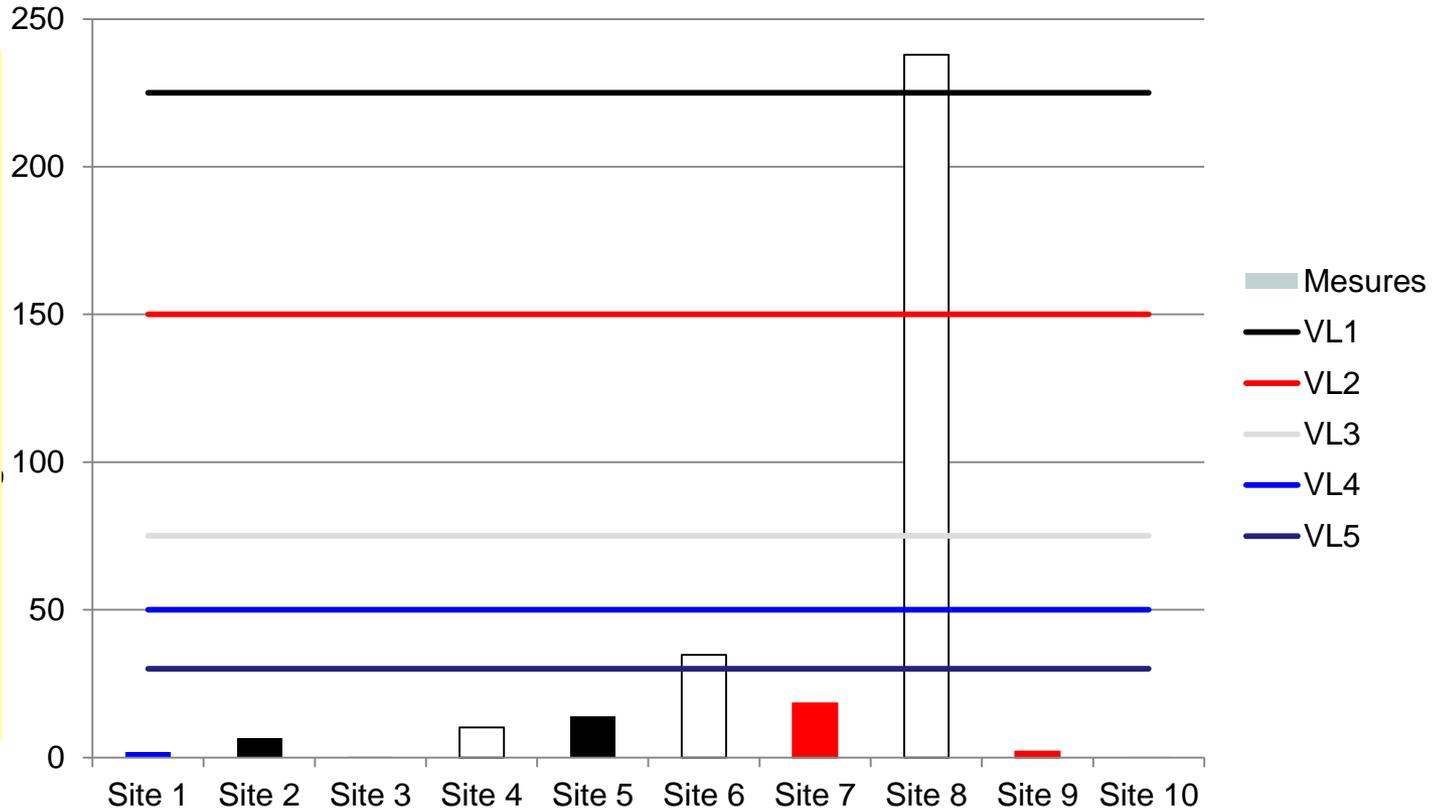
VL1 : Déclaration avant le 1^{er} janvier 2014 entre 2 et 4 MW

VL2 : Déclaration avant le 1^{er} janvier 2014 entre 4 et 10 MW ou supérieure à 10 MW hors PPA

VL3 : avant le 1^{er} janvier 2014 supérieures à 10 MW sous PPA

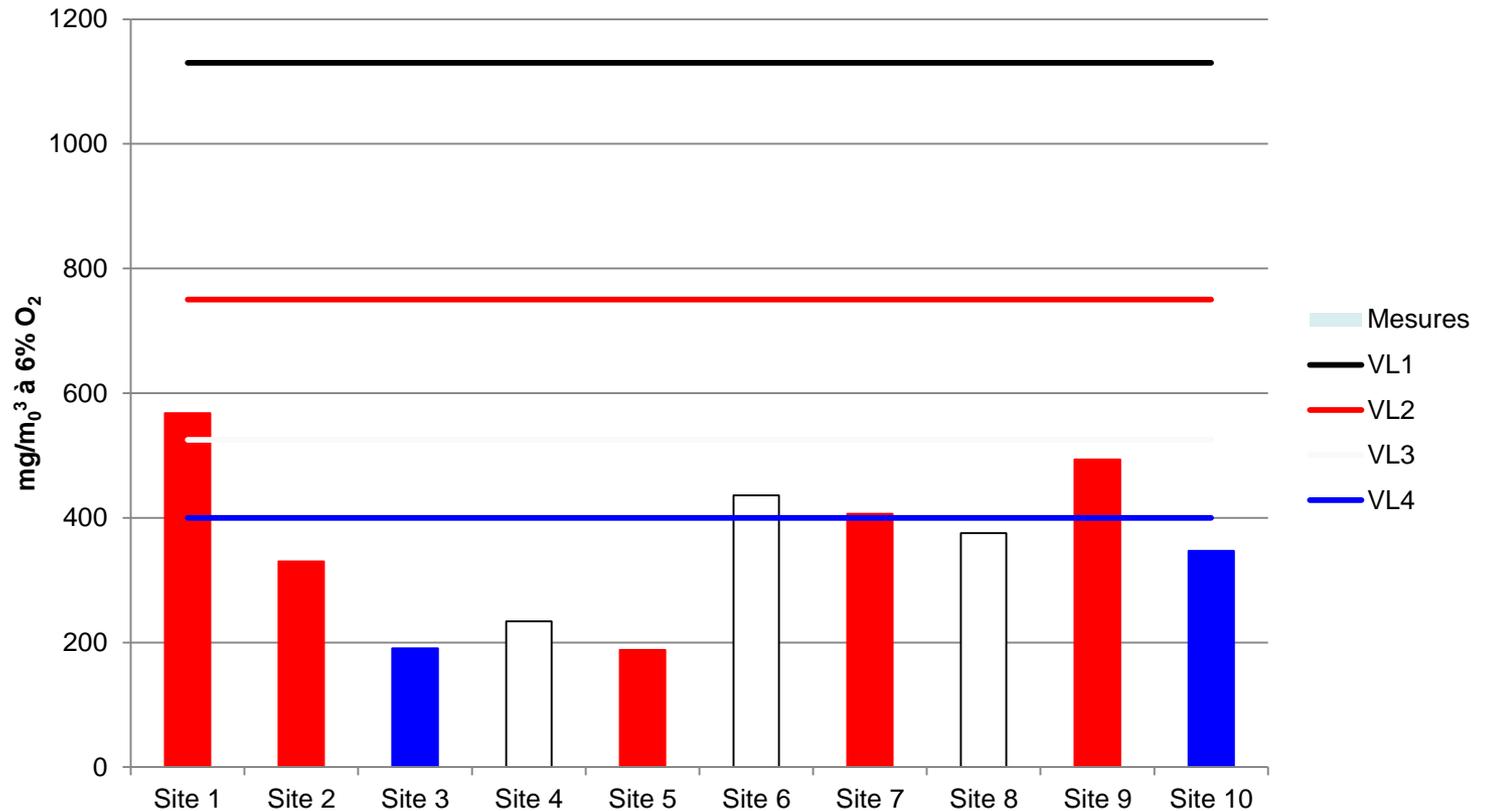
VL4 : Installations soumises à déclaration ou enregistrement dès 0,1 MW (installations existantes à partir de 2018)

VL5 : Autorisation hors PPA



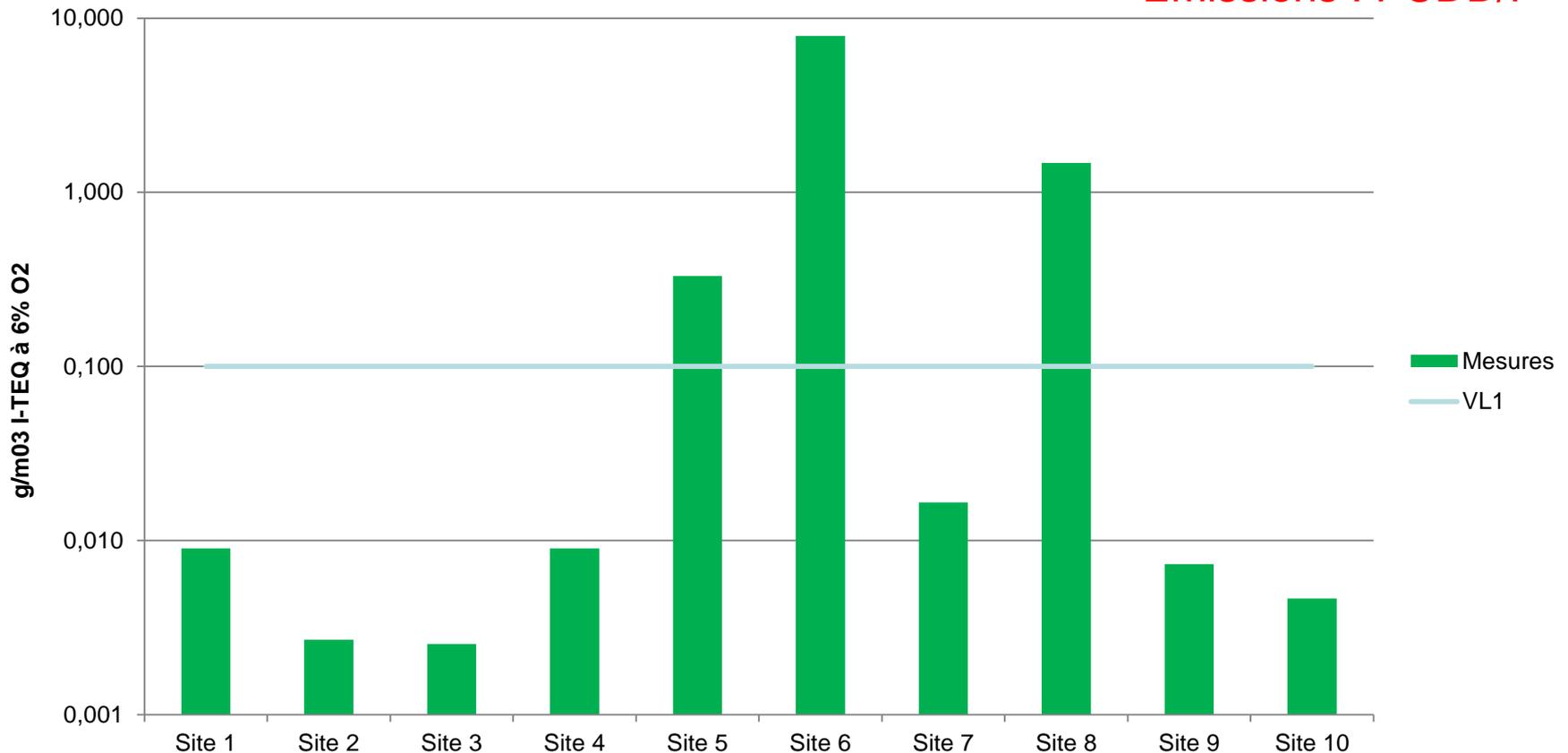
- Rejets bien maîtrisés par les installations (sauf site 8)
- Respect des évolutions réglementaires pour 9 chaufferies sur 10

Emissions : NOx



Bons résultats sur les deux chaufferies équipées bas-NOx (sites 3 et 4)
 Toutes les chaufferies respectent la réglementation

Emissions : PCDD/F



Trois dépassements du seuil de $0,1 \text{ ng/m}_0^3$

Deux dépassements s'expliquent par de mauvaises conditions de combustion, et sont associés à des rejets de poussières

Emissions atmosphériques : autres paramètres

- Métaux :
 - *respect des VLE*
 - *valeurs élevées pour les 2 sites non soumis à Déclaration*
- Faibles émissions de SO₂, HCl, HF
- Rejets de CO maîtrisés sauf sur un site (site 10) ayant par ailleurs de bonnes performances
- Peu d'HCB et de PCB dioxin-like

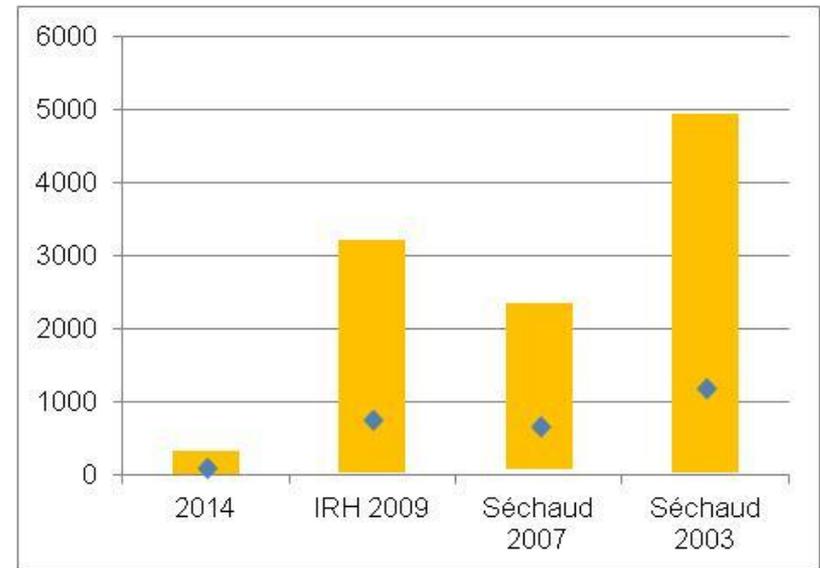
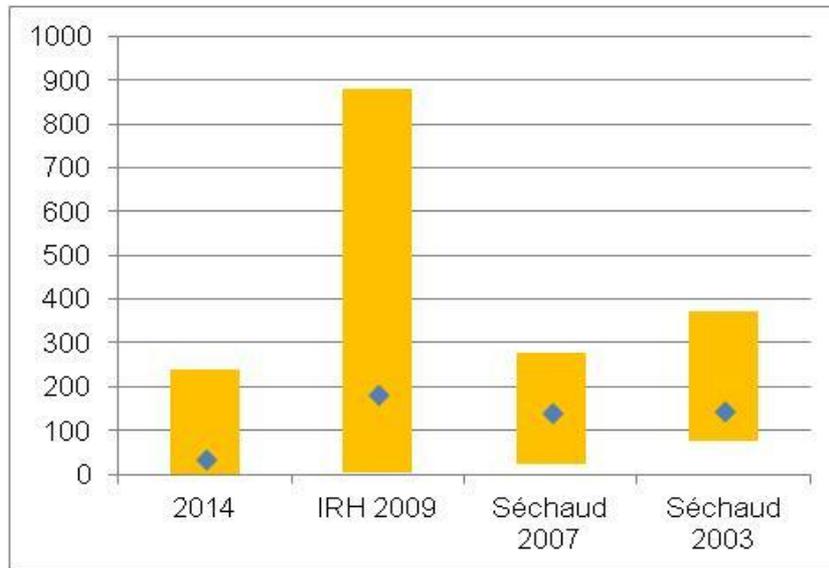
Bilan national



Comparaison aux études ADEME antérieures

Poussières

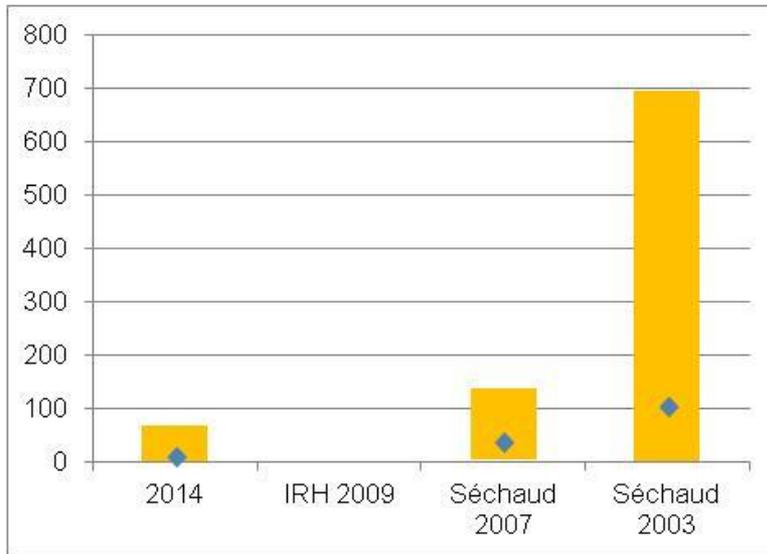
CO



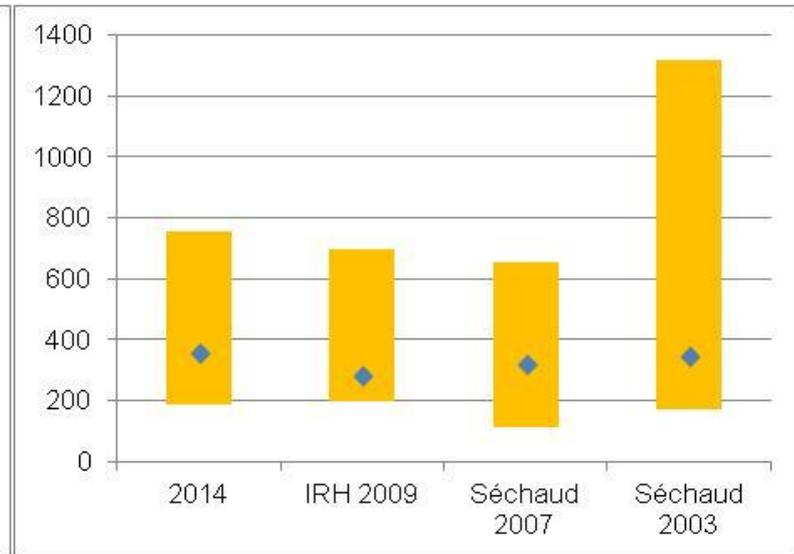
- *Baisse significative des émissions de poussières (généralisation des filtres à manches et électro-filtres)*
- *Baisse des émissions de CO (meilleure maîtrise de la combustion)*

Comparaison aux études ADEME antérieures

COVNM



NOx



- *Peu de progrès sur les NOx (cependant voies de progrès très nettes sur les chaufferies équipées SNCR ou avec la conception de foyer de technologie bas-NOx)*
- *Baisse des émissions de COV (meilleure maîtrise de la combustion)*

Facteurs d'émission spécifiques par chaufferie

Paramètres	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Med.	Moy	Données CITEPA 2005	
														urbain	Indus.
Épuration		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM				
Poussières	g/GJ	0,64	2,5	0,14	3,6	4,0	13	6,7	85	0,65	0,11	3,1	11,7	49	100
Cr	mg/G _J	1,6	2,2	1,5	5,5	5,9	10	3,9	19	2,1	0,83	3,1	5,2	47	47
Cu	mg/G _J	9,0	3,6	1,2	13	4,7	56	8,3	19	14	0,52	8,7	12,9	31	31
Ni	mg/G _J	1,4	1,3	1,2	1,8	7,2	3,4	12,4	4,4	1,5	0,56	1,7	3,5	11	11
Zn	mg/G _J	60	88	16	68	31	2903	126	366	69	5,9	68	373	290	290
As	mg/G _J	0,36	0,59	0,22	2,2	0,26	41	1,4	10	0,89	0,093	0,7	5,7	9,5	9,5
Se	mg/G _J	2,8	1,7	2,0	1,4	2,0	3,8	6,3	5,7	1,8	0,90	2,0	2,8	7	7
Cd	mg/G _J	3,6	0,53	6,4	3,0	0,37	8,9	0,91	5,4	1,0	0,60	2,0	3,1	1,4	1,4
Hg	mg/G _J	1,4	5,2	0,086	0,34	0,23	2,7	2,4	2,8	2,0	0,53	1,7	1,8	0,8	0,8
Pb	mg/G _J	9,5	20	1,7	8,5	3,4	1053	34	79	12	0,37	10,6	122	90	90

Facteurs d'émission spécifiques par chaufferie

Paramètres	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Med.	Moy	Données CITEPA 2005	
Epuration		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM			urbain	industrielle
CO	g/GJ	13	27	3,5	2,8	6,6	50	7,6	116	10	101	11,2	33,7	250	250
NOx	g/GJ	217	128	74	83	54	156	149	135	159	132	133	129	167	200
COVNM	g/GJ	2,2	0,29	0,27	0,072	0,22	24	0,62	1,7	0,50	0,14	0,4	3,0	4,8	4,8
SO ₂	g/GJ	8,2	0,082	7,3	0,095	0,34	2,6	1,7	8,0	7,0	0,06	2,1	3,5	10	10
PCDD/F	ng/GJI-TEQ	3,5	1,0	1,0	3,2	95	2819	6,1	529	2,4	1,8	3,4	346	40	40
HAP (8)	mg/GJ	1,34	0,17	0,071	0,30	2,2	0,25	0,31	51	2,4	0,74	0,5	5,9	8,1	8,1

Emissions de poussières, CO, COVNM, PCDD/F et HAP inférieures aux données CITEPA

Conclusions



Conclusions

- **Combustible**
 - *Qualité conforme (humidité à surveiller)*
 - *Respect global des seuils Enregistrement de la 2910-B*
- **Cendres**
 - *Sous foyer et multi-cyclone : Respect des seuils pour épandage*
 - *Volantes : concentrations en métaux et PCDD/F élevées, souvent au-delà des seuils fixés pour l'enregistrement*
- **Emissions atmosphériques**
 - *Nette progression par rapport aux campagnes précédentes (présence de filtres)*
 - *2 installations < 2 MW avec des rejets nettement plus élevés*

Conclusions

- **Efficiace énergétique**
 - *Bon dimensionnement (sauf 1 parmi les 10)*
 - *Rendement élevé dès que le taux de charge moyen annuel dépasse 40 %*
- **Recommandations**
 - *Améliorer la connaissance des approvisionnements (dispositif SSD)*
 - *Améliorer la conception des dispositifs de manutention*
 - *Améliorer l'exploitation quotidienne (petites installations)*
 - *Analyser les conditions de rénovation des installations plus anciennes*
 - *Promouvoir la mise en place de filières pérennes de valorisation des cendres*