

RAPPORT D'ÉTUDE

21/10/2009

N° -DRC-09-103316-10816A-

**Facteurs d'émission de polluants des
installations de chauffage domestique au gaz et
au fioul**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Facteurs d'émission de polluants des installations de chauffage domestique au gaz et au fioul

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement
Durable et de la Mer (MEEDDM)

Liste des personnes ayant participé à l'étude : A. Dermigny, N. Karoski, P. Lavrilloux, A. Séby, S. Collet

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.


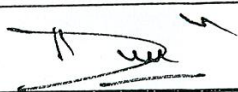

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Serge COLLET	Jean POULLEAU	Nicolas ALSAC
Qualité	Ingénieur unité « Sources et Emissions »	Responsable de l'unité « Sources et Emissions »	Responsable du pôle « Caractérisation de l'environnement »
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. RESUME.....	6
2. PRESENTATION.....	8
3. PARC FRANÇAIS DE CHAUDIERES.....	9
3.1 Vente et données sur le parc	9
3.2 Prévision et tendances du marché	13
3.2.1 Prévisions	13
3.2.2 Age moyen et durée de vie des chaudières.....	14
3.2.2.1 Age moyen	14
3.2.2.2 Durée de vie	14
4. CARACTERISTIQUES DES CHAUDIERES	16
4.1 Technologies de chaudières testées.....	16
4.2 Les différentes catégories de brûleurs testés.....	17
4.3 La combustion et les combustibles utilisés au sein d'une chaudière.....	18
4.3.1 La réaction de combustion.....	18
4.3.2 Les combustibles utilisés	18
5. PROGRAMME D'ESSAIS	19
5.1 Essais sur site	19
5.2 Essais sur banc.....	20
6. RESULTATS ET EXPLOITATION	22
6.1 Résultats des essais sur site.....	22
6.2 Résultats des essais sur banc.....	23
6.2.1 Tableau répertoriant les facteurs d'émissions des polluants	23
6.2.2 Répartition des émissions de polluants lors des essais sur banc.....	25
6.2.3 Comparaison avec d'autres données françaises	29
6.3 Comparaison des résultats des essais sur site et sur banc.....	31
7. COMMENTAIRES / CONCLUSIONS	33
8. BIBLIOGRAPHIE	34
9. LISTE DES ANNEXES	34

1. RESUME

La consommation d'énergie et l'émission de polluants sont indissociables. Le secteur des installations de chauffage domestique au gaz et au fioul génère des émissions de polluants qui dépendent du combustible utilisé, de la technologie de la chaudière mais aussi de ses réglages. Ces paramètres jouent sur la qualité de la combustion et donc sur la quantité de polluants émis.

L'objectif de cette étude est de remettre à jour les facteurs d'émission de polluants des installations de chauffage domestique au fioul et au gaz utilisées dans le cadre de l'inventaire national d'émission. La remise à jour de ces valeurs permet de mieux rendre compte de l'évolution des émissions de polluants émises ces dernières années par ces installations.

Afin d'obtenir les facteurs d'émissions les plus représentatifs possibles des conditions réelles d'utilisation et de fonctionnement, un programme d'essai a été établi.

Dans un premier temps, des essais sur site simplifiés réalisés sur des chaudières au domicile de particuliers, ont été effectués sur sept chaudières de technologie et d'âge différents et utilisant divers combustibles, de façon à observer les conditions de fonctionnement de ces installations sur 2 à 4 jours en conditions réelles. Deux polluants (CO et NO_x) ont été mesurés lors de ces premiers essais.

Suite à ces premières observations, des essais sur banc (simulation de l'environnement de fonctionnement d'un système, ici ce sont les chaudières à des fins de test) ont été menés sur sept types de chaudières de technologie et d'âge différents et utilisant divers combustibles, à différentes allures censées représenter les conditions de fonctionnement réelles des chaudières (allure dite « dégradée ») tout en se calant par rapport aux essais effectués dans le cadre des normes relatives à ces appareils (allures nominale et réduite).

Lors des essais, les principaux polluants émis par ces installations ont été mesurés : CO, NO_x, HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), COV (composés organiques volatils), dioxines et furanes (seulement pour les chaudières au fioul) et particules (totales, PM10, PM2,5, PM1).

Le nombre de chaudières testées n'est pas suffisant pour tirer des enseignements et des règles définitives mais les résultats permettent de faire néanmoins quelques constats :

- on remarque que davantage que l'âge de la chaudière c'est plutôt la conception de la chaudière qui joue un rôle fondamental quant à l'émission de polluants,
- la comparaison des résultats entre les essais sur site et sur banc a permis de constater que les émissions de NO_x et de CO générées lors des essais sur site (dans les conditions réelles de fonctionnement des chaudières) étaient du même ordre de grandeur (compte tenu des fluctuations habituellement observées au sein d'une même catégorie de chaudières) que celles générées lors des essais sur banc,
- en ce qui concerne les émissions des COV, les résultats obtenus à allure dite « dégradée », considérée comme plus représentative des conditions réelles de fonctionnement de ces installations, sont bien supérieurs aux essais effectués à allure nominale. Pour d'autres polluants, tels que les PM ou les HAP, des écarts importants entre ces deux allures sont également parfois constatés sur certaines chaudières,
- l'exploitation des résultats montre que la dépendance des polluants les uns par rapport aux autres est difficile à mettre en évidence (pas de corrélation constatée) du fait probablement du comportement propre à chaque appareil,

- les chaudières au fioul génèrent davantage de particules et de HAP que les chaudières au gaz,
- concernant les chaudières au gaz, l'allure réduite est celle qui génère la plus grande pollution (hors NO_x),
- et, toujours concernant les chaudières au gaz, celle à condensation murale étanche récente est la chaudière qui est la moins émettrice de polluants. Les performances de cette chaudière sont par ailleurs à peu près maintenues quel que soit l'allure (hors COV à allure dégradée). L'achat des chaudières à condensation est favorisé en France par rapport aux autres technologies par un taux de crédit d'impôt supérieur. En effet, ces chaudières permettent des économies d'énergie mais aussi, comme on a pu le constater une meilleure préservation de l'environnement.

Parallèlement à ces essais, une recherche a été effectuée afin d'obtenir une meilleure connaissance :

- du parc (sélection et synthèse d'informations relatives au parc de chaudières français),
- des normes qui s'appliquent aux chaudières et brûleurs testés durant le programme d'essais,
- et des émissions de polluants (comparaison des valeurs obtenues dans le cadre de cette étude avec d'autres données françaises disponibles).

2. PRESENTATION

La consommation d'énergie et l'émission de polluants sont indissociables. Le secteur des installations de chauffage domestique au gaz et au fioul génère des émissions de polluants qui dépendent du combustible utilisé, de la technologie de la chaudière mais aussi de ses réglages. Ces paramètres jouent sur la qualité de la combustion et donc sur la quantité de polluants émis.

L'objectif de cette étude est de remettre à jour les facteurs d'émission de polluants des installations de chauffage domestique au fioul et au gaz utilisées dans le cadre de l'inventaire national d'émission géré par le Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA). Cette mise à jour est nécessaire pour estimer l'évolution des émissions de polluants qui sont actuellement générées par rapport aux émissions répertoriées lors du dernier inventaire et pour justifier du respect par la France de ses engagements internationaux en termes de réduction ou de limitation des émissions de substances dans l'air à la demande du ministère chargé de l'environnement.

Dans le cadre de cette étude, les polluants suivants ont fait l'objet de mesure en raison de leur impact pour la santé humaine et / ou l'environnement :

- les poussières totales ou fines,
- le SO₂, qui provient de la combustion du fioul. En brûlant, le fioul libère le soufre qu'il contient, lequel se combine à l'oxygène pour former le SO₂,
- les NO_x qui résultent principalement de la combinaison à haute température de l'oxygène de l'air avec l'azote présent dans l'air ou dans le combustible,
- le CO₂ qui est le produit naturel de toute combustion carbonée ; il est non toxique mais contribue à l'accentuation de l'effet de serre,
- les composés issus de combustions non complètes tels que :
 - le CO,
 - les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
 - les composés organiques volatils (COV) qui sont des précurseurs d'ozone troposphérique,
 - les dioxines et furanes. Ces polluants n'ont été recherchés qu'à l'émission des chaudières fioul.

Même si certains de ces polluants sont émis en très faible quantité par chacune de ces chaudières, ce secteur d'activité peut être à l'origine d'émissions importantes du fait du nombre d'installations constituant le parc.

Ce document comprend :

- une description du parc français de chaudières (données provenant d'une étude menée en 2007 par le cabinet VHK pour le compte de la communauté européenne) : parc installé, ventes, perspectives d'évolution,
- les caractéristiques (technologie et type de brûleur) des chaudières testées,
- le programme des essais : tests de matériel sur site dans les conditions réelles d'utilisation et de fonctionnement des chaudières et sur banc dans des conditions maîtrisées,
- les résultats obtenus en termes de facteurs d'émission de polluants.
- une comparaison de ces valeurs avec d'autres données françaises récentes disponibles.

3. PARC FRANÇAIS DE CHAUDIERES

Le cabinet VHK^{1,2} a réalisé en 2007 pour le compte de la communauté européenne une analyse du marché européen, pays par pays, des chaudières domestiques fonctionnant au gaz et au fioul. Lors de cette étude, le parc actuel et à venir a été évalué pour les différents types de chaudières de chauffage central au gaz et au fioul en prenant en compte :

Les années de références suivantes :

- 1990 : conférence de Kyoto ;
- 2004 : données réelles les plus récentes ;
- 2010 : fin de la phase 1 de Kyoto ;
- 2025 : année à partir de laquelle toutes les nouvelles éco-conceptions d'aujourd'hui seront absorbées par le marché.

Les données du parc suivantes :

- le parc installé et le taux de pénétration ;
- le taux de croissance des ventes annuelles (% des unités physiques) ;
- les ventes totales ;
- les ventes de remplacement ;
- les nouvelles ventes ;
- la durée de vie moyenne du produit, en différenciant durée de vie totale et temps de service.

Les données de vente qui donnent une segmentation par :

- classe de capacité (chaudières au gaz murales, chaudières au gaz au sol, les chaudières au fioul) ;
- classe d'efficacité (celles qui condensent et celles qui ne condensent pas) ;
- production ou non d'eau chaude.

3.1 VENTE ET DONNEES SUR LE PARC

Il faut noter que le parc de logements comprend les habitations principales, les résidences secondaires et vacantes. Les données sur le parc se réfèrent au nombre d'habitations, alors que les données de vente se réfèrent aux unités de vente seulement. Comme il est précisé dans les tableaux 1 à 6, les données en nombre doivent être multipliées par 1000.

Le tableau 1 présente le parc de chaudières domestiques répertoriées en France dans les années 1990 et 2004.

On constate que la part du parc total de logements équipée d'un chauffage central au fioul et au gaz a augmenté de 11,8% entre 1990 et 2004, soit une augmentation de 5,436 millions de logements ayant choisi ce mode de chauffage.

Cela signifie que la part des autres modes de chauffage tels que les systèmes individuels au gaz (bouteilles), le réseau de chauffage urbain, ceux à l'électricité et aux combustibles solides sont en déclin; ils représentent une part de 39,6% en 2004 contre 51,4% en 1990. Dans le secteur du chauffage central individuel, la croissance est venue des chaudières au gaz dont la part est passée de 20,2% en 1990 à 29,5% en 2004.

Tableau 1 : Parc de chaudières de chauffage domestique en France

Année	1990		2004	
	Logements (x 1000)	%	Logements (x 1000)	%
Logements individuels				
Gaz murale sans condensation	3450	13.1	6697	22.2
Gaz murale à condensation	120	0.5	184	0.6
Gaz sol	1735	6.6	2026	6.7
Fioul	3580	13.6	4361	14.4
Total chaudières gaz/fioul*	8885	33.7	13354	44.2
Logements collectifs	3922	14.9	4889	16.2
Total logements	26338	100	30218	100
Dont total chaudières	12807	48.6	18243	60.4

* excluant les chaudières à combustibles solides

Le tableau 2 présente les ventes des différents types de chaudières domestiques en 1990 et 2004.

Tableau 2 : Ventes par type de chaudières en France

Année	1990		2004	
	Nombre (x 1000)	%	Nombre (x 1000)	%
Vente				
Gaz murale sans condensation	318	58.8	505	60.6
Gaz murale à condensation	14	2.6	32	3.9
Gaz sol	62	11.5	69	8.3
Fioul	130	24.0	199	23.8
Total chaudières gaz/fioul*	524	96.9	805	96.5
Total chaudières*	541	100	834	100

* le total des chaudières prend également en compte d'autres types de chaudières fonctionnant avec des combustibles solides, de l'électricité et des pompes à chaleur

Les chaudières au gaz sont les appareils les plus vendus en 1990 et 2004 avec 73% des ventes environ. La part des chaudières à condensation (les plus performantes) reste très faible, elle est de 2,6% en 1990 et de 3,9% en 2004 (en légère augmentation).

Le tableau 3 présente la répartition des ventes de chaudières en 2004.

Tableau 3 : Répartition des ventes de chaudières en France en 2004

Vente	Ventes totales		Nouvelles habitations		Première installation		Remplacement		Non résidentiel	
	x1000	x1000	%	x1000	%	x1000	%	x1000	%	
Gaz murale sans condensation	505	141.9	28.1	77.3	15.3	258.6	51.2	27.3	5.4	
Gaz murale à condensation	32	9.9	30.6	4.2	13.0	16.8	51.8	1.5	4.6	
Gaz sol	69	7.6	11.0	5.6	8.1	51.7	75.2	3.9	5.7	
Fioul sans condensation	199	12.1	6.1	11.9	6.0	163.5	82.3	11.1	5.6	
Total	805	171.5	21.3	99	12.4	490.6	60.9	43.8	5.4	

En 2004, le marché de la chaudière est essentiellement un marché de remplacement. Les ventes de remplacement représentent 61% alors que celles des nouveaux logements ne représentent que 21,3% ; la première installation (12,4%) correspond à des situations où le logement disposait d'un autre mode de chauffage (radiateurs électriques ou pas de chauffage par exemple). Une fraction des ventes n'est pas destinée à un usage résidentiel (5,4%) mais à un usage tertiaire ou industriel (bureaux, magasins, bars, etc.).

Le tableau 4 ci-après donne une estimation de la répartition prévisionnelle des ventes de chaudières en France en 2015.

Tableau 4 : Perspectives des ventes de chaudières en 2015 en France

Vente	Ventes totales		Nouvelles habitations		Première installation		Remplacement		Non résidentiel	
	x1000	x1000	%	x1000	%	x1000	%	x1000	%	
Gaz murale sans condensation	277	77.8	9.8	42.4	5.3	141.8	17.9	15	1.9	
Gaz murale à condensation	415	127	16.0	54	6.8	215	27.1	19	2.4	
Gaz sol	9	1	0.1	0.7	0.1	6.8	0.9	0.5	0.1	
Fioul sans condensation	28	1.7	0.2	1.9	0.2	23	2.9	1.6	0.2	
Fioul avec condensation	65	4.0	0.5	3.7	0.5	52.6	6.6	3.6	0.5	
Total	794	211.5	26.6	102.7	12.9	440.1	55.5	39.7	5.0	

En 2015, le marché de la chaudière devrait également être essentiellement un marché de remplacement. Les ventes de remplacement devraient se situer entre 53,1 et 55,5% et celles pour les nouveaux logements ne représenteront que 26,6 à 28,4%. Les ventes de première installation devraient être comprises entre 12,9 à 13,5%. Les ventes aux clients non résidentiels sont estimées à 5%.

De 2004 à 2015, on note une baisse des ventes de remplacement 61% en 2004 à 53,1% en 2015 au profit de celles pour les nouveaux logements 21,3% en 2004 à 26,6% en 2015 et des premières installations 12,4% en 2004 à 12,9% en 2015. Les ventes aux clients non résidentiels restent stables : 5,4% (2004) à 5% (2015).

Le tableau 5 présente la segmentation de trois catégories de chaudières pour l'année 2004.

Tableau 5 : Segmentation des chaudières en 2004 en France

	Gaz murale		Gaz sol		Fioul				
	x1000	%	x1000	%	x1000	%			
Total	537.3	100	68.5	100	199	100			
Condensation									
• sans	505	94	66	96.4	196.5	98.7			
• avec	32.3	6	2.5	3.6	2.5	1.3			
Production d'eau chaude									
• non combinée*	66.2	12.3	68.3	99.7	199	100			
• combinée	471.1	87.7	0.2	0.3	0	0			
Puissance (kW)									
	< 15	-	-	< 30	55	80.3	< 30	161.8	81.4
	15-25	430	80	30-70	10.1	14.7	30-70	24.9	12.5
	> 25	107.3	20	> 70	3.4	5	> 70	12.2	6.1
Brûleur									
• conventionnel	500.9	93.2	34.5	50.4					
• prémélange + ventilateur	32.3	6.0	2.2	3.2					
• autres bas NO _x	4.1	0.8	31.8	46.4					
Evacuation des fumées									
• par conduit	232.3	43.2	48.4	70.7	164.3	82.6			
• par ventouse	305	56.8	20.1	29.3	34.7	17.4			

* les chaudières combinées assurent à la fois la fonction de chauffage des locaux et la production d'eau chaude alors que les chaudières non combinées possèdent seulement la fonction de chauffage des locaux

Chaudière murale à gaz : 94% des ventes de chaudières murales à gaz ne sont pas des unités à condensation et sont majoritairement combinées (87,7%). Les équipements les plus vendus ont une puissance comprise entre 15 et 25 kW (80%). Les brûleurs conventionnels sont les plus utilisés (93,2%) et l'évacuation des fumées se fait au moyen d'une conduite (43,2%) ou d'une ventouse (chaudière de type C - 56,8%).

Chaudière au sol à gaz : elles sont utilisées à la fois dans les secteurs résidentiels et non résidentiels. 96,4% des ventes de chaudières au sol à gaz ne sont pas à condensation et sont quasiment totalement non combinées. La pénétration de la condensation reste très inférieure à celle des chaudières murales. Les équipements les plus vendus ont une puissance inférieure à 30 kW (80,3%). Les brûleurs les plus utilisés sont conventionnels (50,4%) et bas NO_x (46,4%). L'évacuation des fumées se fait principalement au moyen d'une conduite (70,7%).

Chaudière au fioul : elles sont généralement situées dans des habitations ayant une cave ou un domaine non fréquenté par les occupants. 98,7% ne sont pas des chaudières à condensation et sont totalement non combinées. Les équipements les plus vendus ont une puissance inférieure à 30 kW (81,4%). L'évacuation des fumées se fait principalement au moyen d'une conduite (82,6%). La pénétration de la condensation dans ce secteur est estimée faible.

3.2 PREVISIONS ET TENDANCES DU MARCHE

3.2.1 PREVISIONS

Les ventes devraient croître respectivement de 5,5% entre 2004 et 2010 et de 20% entre 2010 et 2025, soit une augmentation annuelle de 1,2%.

Les impacts négatifs sur la croissance pourraient provenir :

- de la saturation du chauffage central et du ralentissement de la demande de première installation,
- d'une expansion continue des réseaux de chauffage urbain,
- d'une éventuelle apparition d'appareils de chauffage ayant une durée de vie suffisante pour être remplacés moins souvent.

La croissance devrait donc provenir d'une augmentation de la demande de remplacement.

La tendance à généraliser l'utilisation des chaudières murales et le déclin des chaudières au sol signifie qu'une proportion croissante du parc a une courte durée de vie, ce qui exige de remplacer plus fréquemment ces équipements (plus la technologie des chaudières est avancée et plus la durée de vie est courte).

Le tableau 6 présente les perspectives de ventes établies à partir des années 1990 et 2004.

Tableau 6 : Perspectives de ventes de 1990 à 2025 (x1000)

Chaudière	1990	2004	2010	2015	2020	2025
Gaz murale sans condensation	318	505	298	277	263	235
Gaz murale à condensation	14	32	340	415	472	538
Gaz sol sans condensation	64	69	18	9	5	3
Fioul sans condensation	128	199	50	28	10	10
Fioul à condensation			56	65	78	82
Total	524	805	762	794	828	868

La croissance des ventes de chaudières murales devrait se poursuivre sur le long terme alors que la part des chaudières au sol est attendue en diminution avec une nette croissance des ventes vers les chaudières à condensation.

Depuis les années 1980, de nombreuses tentatives ont été faites pour améliorer la performance écologique des produits de chauffage central par des mesures incitatives. Il reste encore un volume important de chaudières à remplacer. Sur la base des différentes hypothèses énoncées, il est prévu que, sans autres mesures incitatives, une part importante de chaudières standards sera vendue entre 2011 et 2025.

3.2.2 AGE MOYEN ET DUREE DE VIE DES CHAUDIERES

3.2.2.1 AGE MOYEN

L'âge moyen des chaudières est déterminé à partir des caractéristiques du parc et peut être utilisé pour interpréter ou ajuster les estimations des taux de remplacement. Dans un parc assez récent, l'âge moyen est assez faible et le taux de remplacement devrait être plus faible encore. Dans un marché bien établi, tel que celui de la France, l'âge moyen et le taux de remplacement des chaudières au gaz est évidemment plus élevé.

Le tableau n°7 présente l'âge des chaudières au gaz et au fioul déterminé avec des données recueillies en 1999 afin de déterminer l'âge moyen des chaudières.

Tableau 7 : Âge moyen des chaudières en France

Périodes	Age moyen au cours de la période	Gaz	Fioul
> 30 ans	35	0%	19%
entre 20 et 30	25	22%	33%
entre 10 et 20	15	48%	30%
< 10	5	30%	18%
Âge moyen	14,2	14,2	20,5

L'âge moyen des chaudières par type de combustible est de 14,2 ans pour les chaudières au gaz et de 20,55 ans pour les chaudières au fioul. Une chaudière au gaz sera donc susceptible d'être remplacée tous les 14 ans et une chaudière au fioul tous les 20 ans et demi. De plus, l'âge moyen pour lequel le renouvellement est recommandé dépend du type de chaudière : 15 ans pour les chaudières murales à gaz, entre 15 et 20 ans pour les chaudières gaz au sol et entre 20 et 25 ans pour celles au fioul.

3.2.2.2 DUREE DE VIE

La durée de vie d'un produit estimée à partir du parc total de chaudières divisé par le nombre de vente de chaudières est de 23 ans. Pour les chaudières au fioul, la durée de vie est essentiellement liée à la durée de vie des composants : brûleurs ou ventilateur qui peuvent tomber en panne et sont souvent remplacés. Il est normal de prolonger la durée de vie des chaudières dans la mesure où les frais de réparation ne dépassent pas le coût de remplacement de la chaudière. Ainsi, la durée de vie d'une chaudière est aussi gouvernée par des motifs économiques. Il faut aussi tenir compte des frais de fonctionnement de l'ancien système par rapport à ceux d'un nouveau système.

Les utilisateurs finaux font rarement le calcul du coût total et s'appuient sur le jugement d'experts. La plupart des installateurs de chaudières recommandent le remplacement après une durée vie de 15 ans pour une chaudière à gaz murale, et de 20 à 25 ans pour une chaudière sol à gaz ou au fioul.

Note : Une recherche bibliographique complémentaire des normes de chaudières testées à été réalisée de façon à connaître les VLE (valeurs limites d'exposition) en NO_x et CO relatées dans ces normes. Cette recherche est présentée en annexe 4.

4. CARACTERISTIQUES DES CHAUDIERES

Une chaudière domestique est un générateur de chauffage qui transforme un combustible liquide ou gazeux en énergie thermique grâce à la réaction de combustion. La chaudière communique cette énergie à un fluide caloporteur (air, eau ou vapeur) chargé de l'acheminer vers les appareils de chauffage (émetteur).

Ce chapitre présente :

- les caractéristiques des chaudières testées,
- les catégories de brûleurs testés,
- ainsi que les combustibles utilisés.

4.1 TECHNOLOGIES DE CHAUDIERES TESTEES

Les chaudières au fioul et à gaz sont constituées de trois parties principales :

- une chambre de combustion où le combustible brûle au contact de l'air,
- un échangeur dans lequel les calories issues de la combustion sont transmises à l'eau ou au fluide caloporteur,
- une cheminée qui permet l'évacuation des produits issus de la combustion.

Plusieurs technologies de chaudières au gaz et au fioul ont été testées au cours des essais :

- chaudière standard : elle délivre une température d'environ 80°C à 90°C à l'eau du réseau de chauffage. Il s'agit de chaudières d'ancienne technologie qui consomment beaucoup d'énergie.
- chaudière basse température : elle porte l'eau du circuit de chauffage aux environs de 75°C, voire 55°C. Les pertes thermiques sont donc minimisées par rapport à la catégorie précédente. Ces chaudières seront par la suite notées BT (basse température).
- chaudière à condensation : dans les fumées issues de la combustion du fioul ou du gaz, se trouve de la vapeur d'eau contenant de l'énergie (la chaleur latente). Seules les chaudières à condensation sont équipées d'un échangeur supplémentaire au niveau du rejet des fumées dans lequel circule l'eau de chauffage avant son introduction dans la chaudière. Les produits issus de la combustion tels que la vapeur d'eau sont ainsi condensés libérant de la chaleur qui est transmise au circuit d'eau chaude de l'habitation. Ce système impose de pouvoir installer un conduit d'évacuation des condensats vers le système de récupération des eaux usées.
- chaudière étanche : contrairement aux chaudières atmosphériques qui puisent l'air dans la pièce où elles se trouvent, les chaudières étanches puisent l'air comburant à l'extérieur du logement à l'aide d'un conduit qui peut également servir à l'évacuation des fumées (ventouse). Un ventilateur rejette les gaz de combustion et aspire simultanément l'air comburant. La chaudière peut alors être installée n'importe où, même dans un local sans cheminée, sans ventilation ni aération car ces chaudières ne nécessitent pas une cheminée traditionnelle puisqu'un conduit d'évacuation assure la sortie des fumées au travers de la façade ou de la toiture.

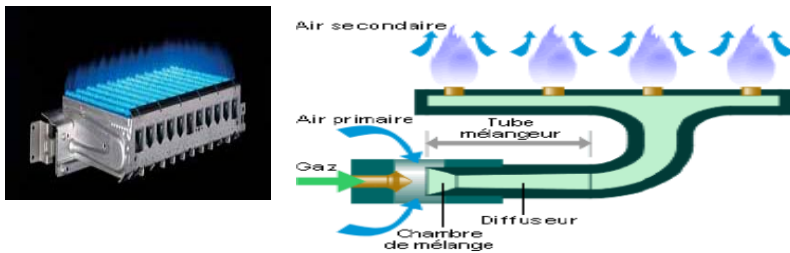
4.2 LES DIFFERENTES CATEGORIES DE BRULEURS TESTES

Le brûleur est le dispositif mécanique permettant l'introduction dans la chambre et le mélange intime entre le combustible et l'air comburant chargé en oxygène afin de favoriser la combustion. Un réglage assez fin est souvent nécessaire pour optimiser le rendement de combustion et réduire la formation d'imbrûlés particulaires et gazeux.

Les brûleurs testés lors des essais sont les suivants :

- brûleur atmosphérique

Le débit du gaz sous pression entraîne l'aspiration de l'air comburant nécessaire à la combustion.



- brûleur à air soufflé

Un brûleur à gaz soufflé est un brûleur avec un ventilateur intégré facilitant l'introduction de l'air comburant et le mélange avec le combustible.



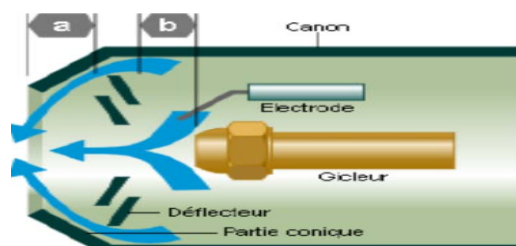
- brûleur à prémélange total

La totalité de l'air est prémélangé au gaz à l'intérieur du brûleur, pour former un mélange, très homogène, offrant ainsi une bonne combustion, un excellent rendement et des émissions polluantes réduites.



- brûleur à flamme jaune

Brûleur dans lequel le fioul est pulvérisé par un gicleur au centre d'un accroche flamme qui répartit l'air de combustion.



4.3 LA COMBUSTION ET LES COMBUSTIBLES UTILISES AU SEIN D'UNE CHAUDIERE

4.3.1 LA REACTION DE COMBUSTION

La combustion est une réaction chimique qui dégage de la chaleur et des fumées. Elle s'obtient en établissant l'oxydation d'un combustible avec un comburant (composé oxygéné apportant de l'oxygène tel que l'air). Le combustible et le comburant réagissent en donnant principalement les produits de combustion CO_2 et H_2O .

Pour qu'une bonne combustion ait lieu, le combustible et le comburant doivent être intimement mélangés. Le dosage et le mélange de l'air avec le combustible est assuré par le brûleur. Le dosage de l'air et du combustible est important, car la réaction de combustion n'est réalisable que dans certaines proportions. Pour que la réaction de combustion soit amorcée, une température minimale d'inflammation du mélange doit être atteinte par l'étincelle très chaude d'un arc électrique ou par la flamme d'une allumette par exemple.

La combustion complète est le résultat de la réaction totale du combustible avec l'oxygène du comburant. Les produits de combustion qui en résultent sont stables et saturés en oxygène. Une combustion incomplète est une réaction qui n'a pas assez d'oxygène et qui produit donc des composés insuffisamment oxydés tels que du monoxyde de carbone, des composés organiques volatils (COV), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), etc. Seule une partie des réactifs a pu se transformer en eau et en dioxyde de carbone.

4.3.2 LES COMBUSTIBLES UTILISES

Un combustible est une matière qui, en présence d'oxygène et d'énergie, peut se combiner à l'oxygène dans une réaction chimique de combustion générant de la chaleur. Leur combustion rejette dans l'atmosphère du dioxyde de carbone.

Les caractéristiques complètes des combustibles utilisés lors des essais sur banc sont fournies en annexe 1 :

- combustible liquide : le fioul domestique (FOD) est un combustible fossile dérivé du pétrole. Il est obtenu par distillation atmosphérique du pétrole brut suivie d'une désulfuration.
- combustible gazeux : le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures présent naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse. Il existe plusieurs formes de gaz naturel, se distinguant par leur origine, leur composition et le type de réservoirs dans lesquels ils se trouvent. Néanmoins, le gaz est toujours composé principalement de méthane et issu de la désagrégation d'anciens organismes vivants.

5. PROGRAMME D'ESSAIS

Ces chaudières ont été sélectionnées de façon à être les plus représentatives possibles du parc français actuel.

5.1 ESSAIS SUR SITE

Les essais sur site ont été réalisés au domicile de particuliers disposant de chaudières domestique gaz ou fioul.

Objectifs des essais :

Il s'agissait de cerner l'utilisation et le fonctionnement réels d'appareils de différentes technologies (standard, basse température et condensation) récents et anciens. Sur cinq chaudières, des mesures ont été effectuées avant et après l'entretien annuel de l'installation afin de mieux cerner son influence sur les émissions de polluants.

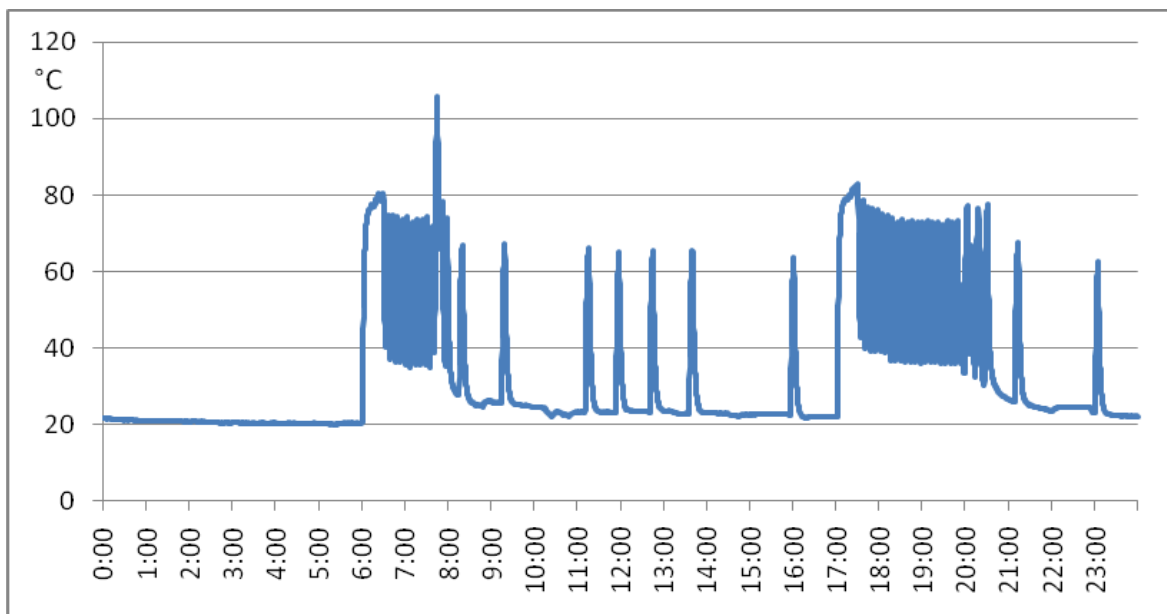
Déroulement des essais et matériel testé :

Afin de mieux cerner les conditions réelles d'utilisation et de fonctionnement des chaudières, des tests simplifiés d'appareils sur site ont été effectués.

Un analyseur a été installé sur site durant une période de 2 à 4 jours à l'émission de chaque chaudière. Les paramètres suivants ont été mesurés : teneurs en O₂, NO_x, CO, CO₂ et température des fumées. Les teneurs en polluants ont été quantifiées au moyen d'un analyseur HORIBA PG250 étalonné avant et après mesure avec des bouteilles de gaz étalons. La vérification de l'étalonnage après plusieurs jours d'essais permet de s'assurer de l'absence de dérive. Une formule de correction linéaire est appliquée si la dérive constatée est supérieure à 2%.

Les périodes de fonctionnement de la chaudière correspondent aux périodes de montée en température des fumées (cf. graphe 1). Une moyenne des teneurs en polluants durant les périodes de fonctionnement de la chaudière a été déterminée. Cette moyenne correspond à la teneur en polluant émis. Les résultats exprimés en ppm ont été convertis en mg/kWh à 0% d'O₂ afin de pouvoir être comparés (cf. annexe 1).

Graphe 1 : Exemple d'évolution de la température dans le conduit d'extraction de la chaudière



Sept chaudières ont ainsi été testées :

- gaz à condensation (année de mise en service 2007),
- gaz standard (1990),
- gaz à condensation (2007),
- fioul basse température (chaudière assez ancienne, année de mise en service non connue),
- fioul standard (1974),
- fioul standard (1990),
- fioul basse température (2009).

5.2 ESSAIS SUR BANC

Les essais sur banc sont une simulation du fonctionnement des chaudières dans un environnement reconstitué (un banc) à des fins de test.

Objectifs des essais :

Il s'agissait d'établir les facteurs d'émissions de polluants pour des appareils de différentes technologies (standard, basse température, ou condensation) récents et anciens.

Déroulement des essais :

Les essais sur banc ont été effectués au Centre Technique des Industries Aérouiques et Thermiques (CETIAT) à Lyon sur une durée de trois semaines.

Pour les chaudières au gaz, trois tests par appareils ont été effectués :

- allure nominale (essai en régime stable à 100% de la charge nominale),
- allure dite « dégradée » de fonctionnement (10 minutes de marche à allure nominale suivies de 2 minutes d'arrêt),
- allure réduite (essai en régime stable à 30% de la charge nominale).

Ces trois allures représentent différentes conditions de marche des chaudières. Les essais à allures réduite et nominale sont déjà décrits dans les normes de tests en vigueur (cf. annexe 4) pour la mise sur le marché de nouveaux appareils. L'allure dégradée a été définie à l'issue des essais sur site de façon à mieux prendre en compte les conditions réelles de marche observées chez les particuliers.

Pour les chaudières au fioul, seulement deux allures ont été testées : nominale et dégradée car il n'est pas possible de régler ces chaudières à 30% de leur charge nominale.

Les essais ont été réalisés sur une période de 4 heures pour chacune des allures testées.

Matériels testés :

Sept chaudières neuves et anciennes prêtées ou récupérées par les constructeurs ont fait l'objet d'essais :

- gaz standard murale ancienne d'une puissance de 16 kW,
- gaz au sol à basse température (BT) ancienne (24 kW),
- gaz murale à BT étanche récente (24,6 kW),
- gaz murale à condensation étanche récente (24 kW),
- fioul BT au sol ancienne (25 à 30 kW),
- fioul BT au sol étanche ancienne (25 kW),
- fioul BT au sol récente (21-27 kW).

Mesures réalisées :

Le diamètre du conduit étant inférieur à 35 cm (diamètre du conduit de l'essai sur banc étant de 15 cm), le prélèvement a été effectué en un seul point situé au centre du conduit de cheminée. La vitesse d'extraction des fumées par la buse de prélèvement étant trop faible (< 2 m/s) pour être mesurée au moyen d'un tube de Pitot, l'ensemble des prélèvements a été effectué à une vitesse au niveau de la buse de 1 m/s (sans respecter les conditions d'isocinétisme c'est-à-dire dans des conditions telles que la vitesse linéaire du flux gazeux pénétrant dans le conduit de prélèvement est égale à celle du flux gazeux non perturbé au point d'échantillonnage).

Les polluants mesurés dans les fumées lors des essais sur banc sont les suivants :

- humidité de l'effluent gazeux,
- mesurage en continu des concentrations en O₂, CO, CO₂, NO_x et COV totaux par analyseurs extractifs,
- mesurage en discontinu des concentrations en particules (totales, PM10, PM2,5 et PM1), en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), en PCDD/PCDF (dioxines et furanes - uniquement sur les chaudières au fioul) et en COV spécifiques.

Les principes de mesures et d'analyses appliqués et les normes de référence (lorsqu'elles existent) sont présentés en annexe 5. Les intervalles de confiance associés sont présentés en annexe 6.

Les teneurs en particules ont été mesurées par impaction. Cette méthode est à présent normalisée (PR ISO 23210) pour la mesure des PM10 et PM2.5 en émissions canalisées industrielles. Elle consiste à réaliser un prélèvement in situ, c'est-à-dire en insérant l'impacteur verticalement dans le conduit dans le sens du flux. Dans le cas de la combustion domestique, le conduit d'évacuation étant relativement étroit (15 cm), il est impossible d'y glisser l'impacteur entièrement sans risquer de perturber l'écoulement des gaz de combustion. Celui-ci est donc placé horizontalement en dehors du conduit et le prélèvement est réalisé avec une canne en forme de col de cygne. Cette procédure n'est pas mentionnée dans le projet de norme mais reste néanmoins la solution la plus adaptée dans le cas des conduits étroits afin d'éviter des pertes de charge trop importantes qui pourraient perturber la combustion.

Parallèlement à ces mesures, d'autres paramètres ont été mesurés en continu : la pression atmosphérique, le CO₂ stœchiométrique, le débit de combustible, le pouvoir fumigène, le pouvoir comburivore, le pouvoir calorifique inférieur, la masse volumique du combustible, la température des fumées et la température ambiante pour le gaz et le fioul lors de chaque essai (l'annexe 2 décrit la détermination du pouvoir comburivore et fumigène).

Les émissions de SO₂ générées par la combustion du fioul n'ont pas été suivies lors de ces essais. Elles ont toutefois été estimées par calcul à partir de la teneur en soufre et du PCI du combustible d'essai (annexe 3).

6. RESULTATS ET EXPLOITATION

Afin d'obtenir des données comparables, des facteurs d'émissions ont été établis. Ils sont exprimés en (milli, micro, nano ou pico) gramme par kilowattheure (m, μ , n ou p)g/kWh d'énergie entrante (énergie contenue dans le combustible) à 0% d'O₂ (unité utilisée par la profession) ou en g/GJ d'énergie entrante (unité utilisée dans le cadre des inventaires nationaux d'émission). Ces derniers sont présentés en annexe 7.

6.1 RESULTATS DES ESSAIS SUR SITE

Les teneurs en polluants émis (CO et NO_x) par les différentes chaudières étudiées sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Facteur d'émission de polluant en mg/kWh à 0% d'O₂ d'énergie entrante

Chaudières testées	Combustible	Année de mise en service	Teneur en CO (mg/kWh à 0% d'O ₂)	Teneur en NO _x (mg/kWh à 0% d'O ₂)
Murale à condensation	gaz	2007	30,8	26,7
Au sol standard	gaz	1990	39,9	203,4
Murale à condensation	gaz	2007	13,8	20,2
BT	fioul	ancienne	24	172
Standard	fioul	1990	32	170
BT	fioul	2009	6	212

Les chaudières au gaz à condensation correspondant à la technologie la plus récente, émettent le moins de NO_x. Il est, par ailleurs, difficile de faire une comparaison entre la technologie, l'âge, le type de combustible car chaque chaudière a un comportement qui lui est propre.

Ces essais ont permis de mieux identifier les conditions réelles d'utilisation des chaudières, notamment de visualiser les fréquences de mises en route et les périodes de fonctionnement de ces installations.

Ces constatations ont servi à préparer les essais sur banc et notamment à reproduire au mieux le fonctionnement d'une chaudière dans les conditions réelles de marche.

Les tests actuels sur les matériels de chauffage se font à allure nominale et réduite c'est-à-dire à 30% de la charge nominale. Or, comme ces essais sur site l'ont montré, une chaudière ne fonctionne pas en continu à allure nominale, même durant les périodes les plus froides. En effet, une chaudière fonctionne en fonction de la demande du particulier qui fixe une température de consigne pour son logement. La température de l'eau ne doit pas dépasser un certain niveau au-delà duquel la chaudière « déclenche », c'est-à-dire se met au repos. Ces constatations nous ont permis de définir un essai dit « à allure dégradée », comprenant des périodes successives de marche et d'arrêt de la chaudière, pour les essais sur banc afin de mieux simuler les conditions réelles.

Mesures avant et après l'entretien annuel de la chaudière :

Sur cinq chaudières, des mesures de CO et NO_x ont été effectuées avant et après l'entretien annuel de la chaudière. Ces entretiens ont été effectués par des sociétés spécialisés. Lors de chaque entretien, un ramonage, un nettoyage et un relevé des paramètres de combustion (O₂, CO₂ et CO) au moyen d'un appareil portable ont été effectués.

Les résultats, présentés dans le tableau ci-après, montre que s'il y a une très légère amélioration de la teneur en CO (4 chaudières sur 5) après entretien, elle se fait au détriment de la teneur en NO_x qui augment de 10% pour ces mêmes 4 chaudières. On voit ici tout l'intérêt de disposer d'un analyseur mesurant également les NO_x afin de trouver l'optimum du réglage pour le meilleur compromis CO/NO_x. Pour la chaudière 3 l'intervention a sensiblement dégradé les concentrations des deux polluants CO et NO_x.

Bien qu'il soit difficile d'extrapoler 5 tests effectués au hasard (à des millions d'entretien effectués chaque année en France), on ne peut que s'interroger sur l'influence de ces opérations d'entretien sur les émissions de polluants dans les conditions dans lesquelles ces opérations sont effectués à l'heure actuelle.

Tableau 9 : Facteur d'émission de polluant en mg/kWh à 0% d'O₂ d'énergie entrante

Chaudières	1	2	3	4	5	valeur moyenne
Combustible	fioul	fioul	gaz	gaz	gaz	
Mesure avant entretien annuel						
[CO] mg/kWh à 0% d'O ₂	24	32	14	31	40	28
[NOx] mg/kWh à 0% d'O ₂	172	170	20	27	203	118
Mesure après entretien annuel						
[CO] mg/kWh à 0% d'O ₂	22	27	38	25	36	30
[NOx] mg/kWh à 0% d'O ₂	191	201	55	23	216	137

6.2 RESULTATS DES ESSAIS SUR BANC

6.2.1 TABLEAU REPERTORIANTE LES FACTEURS D'EMISSIONS DES POLLUANTS

Les rendements utiles des chaudières déterminés lors des essais sur banc sont présentés dans les tableaux 1 et 2 en annexe 1.

Le tableau 10 présente les facteurs d'émission en polluants déterminés lors des essais sur banc.

Tableau 10 : Facteurs d'émissions des polluants mesurés lors des essais sur banc

Type de chaudière	Allure	COVT	Somme COV par canister	PM totales	PM 1	PM 2,5	PM 10	Somme 16 HAP	Somme 8 HAP	Somme 4 HAP	PCDD/PCDF	NO _x	CO
		mg/kWh à 0% d'O ₂	µg/kWh à 0% d'O ₂	mg/kWh à 0% d'O ₂				ng/kWh à 0% d'O ₂			pg I.TEQ/kWh à 0% d'O ₂	mg/kWh à 0% d'O ₂	mg/kWh à 0% d'O ₂
Gaz standard murale ancienne	nominale	< 0,6	137	0,14	0,08	0,11	0,13	862	153	< 7	-	330,2	116,9
	dégradée	2,8	1097	0,02	< 0,002	< 0,002	< 0,002	2593	198	< 6	-	306,3	98,4
	réduite	19,9	4226	1,47	1,20	1,27	1,40	3459	244	< 23	-	131,0	566,3
Gaz condensation murale récente	nominale	< 0,3	157	0,07	0,04	0,06	0,07	244	34	< 4	-	65,3	71,6
	dégradée	16,0	2061	0,01	< 0,002	< 0,002	0,01	449	28	< 4	-	64,4	63,5
	réduite	< 0,3	31	0,14	< 0,002	0,04	0,08	196	23	< 4	-	60,4	16,4
Gaz BT murale étanche récente	nominale	25,9	5282	0,02	< 0,002	0,02	0,02	503	55	< 8	-	188,2	100,9
	dégradée	39,2	7347	0,65	< 0,002	0,18	0,43	1242	109	< 9	-	177,8	131,0
	réduite	68,8	-	0,39	0,20	0,27	0,34	2297	175	< 23	-	121,7	503,6
Gaz BT sol ancienne	nominale	< 0,3	376	0,01	0,00	0,01	0,01	543	47	< 4	-	74,5	9,3
	dégradée	6,6	2134	0,13	0,10	0,11	0,13	232	27	< 4	-	64,1	8,9
Fioul BT sol ancienne	nominale	< 0,3	27	0,30	0,24	0,26	0,28	13332	92	< 3	1,08	178,2	13,2
	dégradée	0,5	825	0,30	0,21	0,25	0,28	13891	< 11	< 4	1,02	201,2	13,4
Fioul BT sol récente	nominale	2,9	1895	4,48	3,84	4,17	4,35	67926	626	< 4	1,99	168,4	61,5
	dégradée	3,7	7114	1,64	1,42	1,54	1,60	126041	886	< 4	1,37	166,3	65,7
Fioul BT sol ancienne	nominale	9,0	611	2,11	1,70	1,89	2,03	175510	34500	1493	3,02	187,2	93,9
	dégradée	5,9	947	1,61	1,35	1,49	1,58	61184	10191	223	2,80	189,8	68,3

6.2.2 REPARTITION DES EMISSIONS DE POLLUANTS LORS DES ESSAIS SUR BANC

A partir des résultats exprimés en g/kWh à 0% d'O₂ pour chaque polluant suivi, il est possible de comparer les facteurs d'émissions pour chaque allure et par type de chaudière.

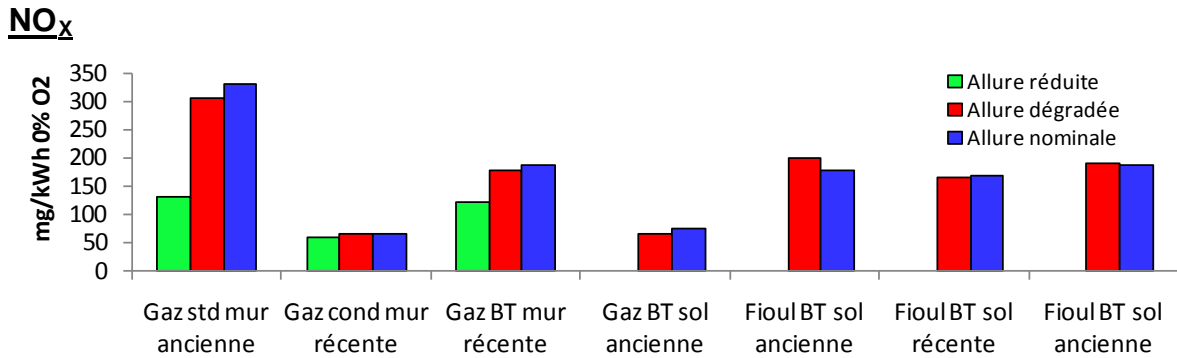


Figure 1 : Facteurs d'émission de NO_x par allure et par type de chaudière

Les allures nominale et dégradée émettent les NO_x dans des proportions similaires pour les chaudières au gaz et au fioul. Particulièrement, pour les chaudières au fioul, l'âge des chaudières ne semble pas avoir d'influence sur les rejets de NO_x. En revanche, le type de brûleur joue un rôle important sur les rejets générés par les chaudières au gaz ; en effet, les quantités de NO_x émis sont très différentes d'une chaudière à l'autre.

Concernant les chaudières au gaz, c'est à allure réduite qu'il y a le moins d'émissions de NO_x. Cela se fait au détriment de la qualité de la combustion car cela entraîne une augmentation des émissions de CO et de COV totaux.

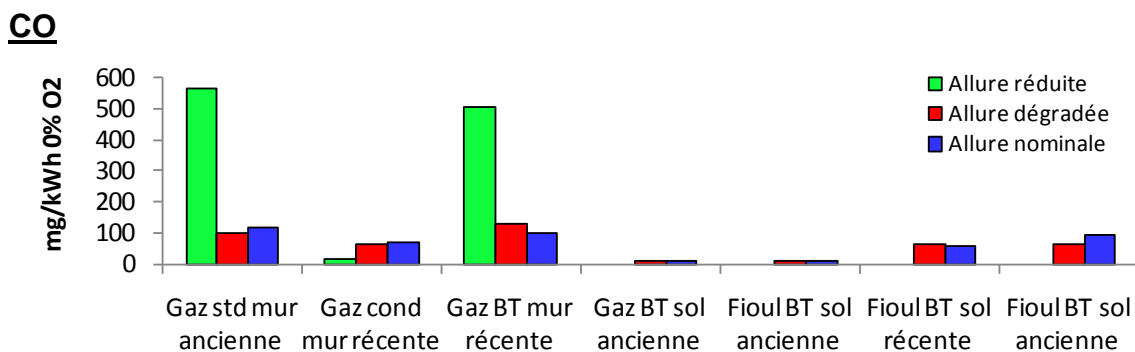


Figure 2 : Facteurs d'émission de CO par allure et par type de chaudière

Comme observé précédemment, il n'y a pas de corrélation entre les rejets de CO et l'âge de la chaudière.

Les niveaux sont du même ordre de grandeur pour les deux combustibles. Pour les chaudières qui admettent une allure réduite (à l'exception de la chaudière au gaz à condensation murale récente), les conditions de combustion sont défavorables puisque la combustion produit du CO et des COV totaux en très grande quantité.

TSP (poussières totales)

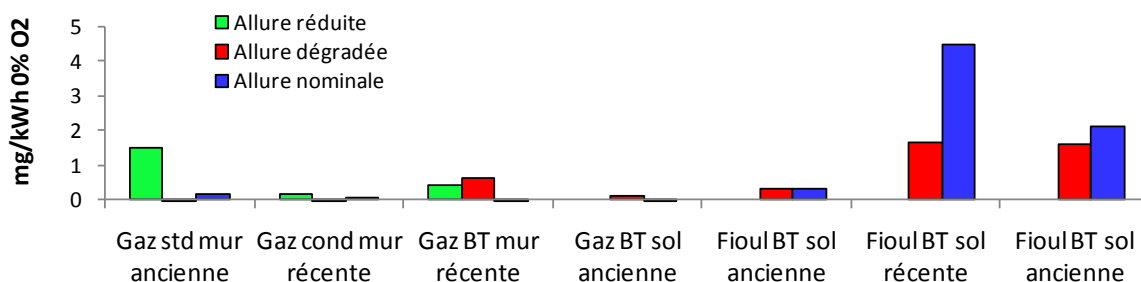


Figure 3 : Facteurs d'émission de TSP par allure et par type de chaudière

Parmi les différentes granulométries étudiées (TSP, PM10, PM2,5 et PM1), seule la figure des TSP a été présentée, l'évolution des PM10, PM2,5 et PM1 étant similaire à celle des TSP.

Pour l'ensemble des chaudières gaz testées, aucune corrélation n'apparaît entre l'émission et l'allure.

Les chaudières au fioul émettent davantage que les chaudières au gaz et génèrent plutôt plus de particules à allure nominale qu'à allure dégradée.

La répartition granulométrique des poussières est la même pour toutes les chaudières au fioul (PM1 : 81% des particules, PM2.5 : 9%, PM10 : 6%). Il n'en est pas de même pour les chaudières au gaz (en moyenne : PM1 : 59% des particules, PM2.5 : 21%, PM10 : 14%) du fait des très faibles teneurs mesurées.

COV totaux

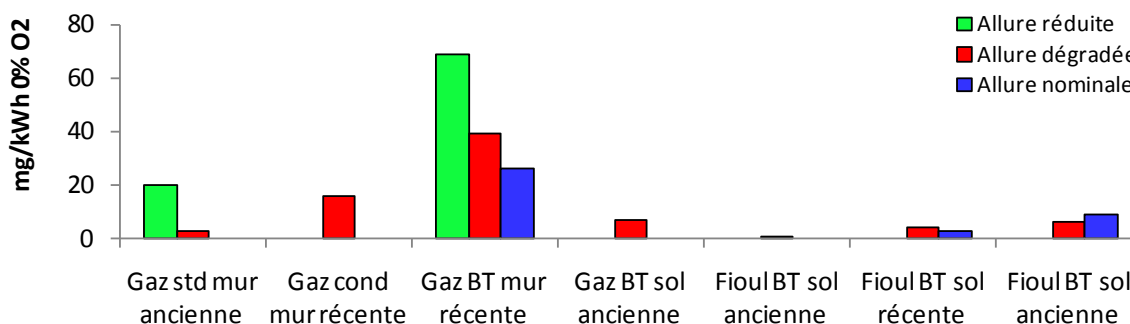


Figure 4 : Facteurs d'émission de COV totaux par allure et par type de chaudière

Il convient de distinguer les COV totaux mesurés directement via un analyseur (figure 4) selon une méthode normalisée et la somme des COV dosés par canister (figure 5).

Les résultats des COV totaux sont en général très supérieurs à la somme des COV dosés par canister. Cette différence s'explique notamment par le fait que les COV les plus légers, tel que le méthane par exemple, ne peuvent être dosés par canister alors qu'ils sont pris en compte pour l'analyse des COV totaux. De plus, seuls les COV identifiés ont été quantifiés par canister. Par ailleurs, les méthodes d'échantillonnage sont différentes : ligne chauffée pour les COV totaux, échantillonnage après refroidissement des fumées pour les canisters.

COV dosés par canister

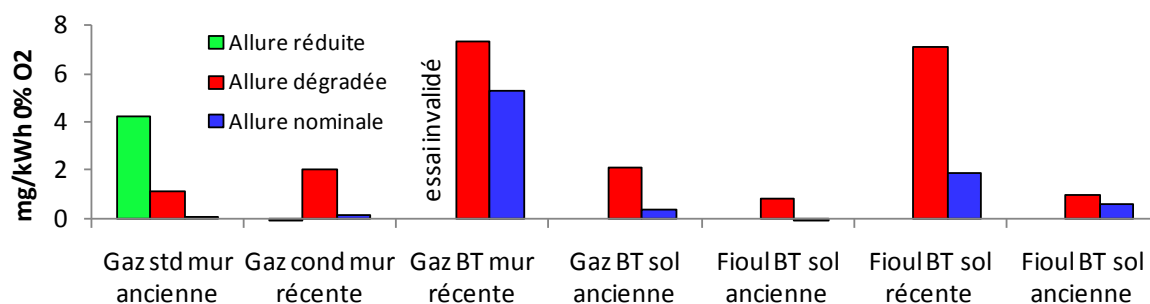


Figure 5 : Facteurs d'émission de COV dosés par canister par allure et par type de chaudière

Concernant les mesures des COV dosés par canister, le prélèvement des fumées de l'essai à allure réduite de la chaudière au gaz BT murale récente n'a pas pu être effectué convenablement lors de la campagne d'essai. Cet essai a été invalidé.

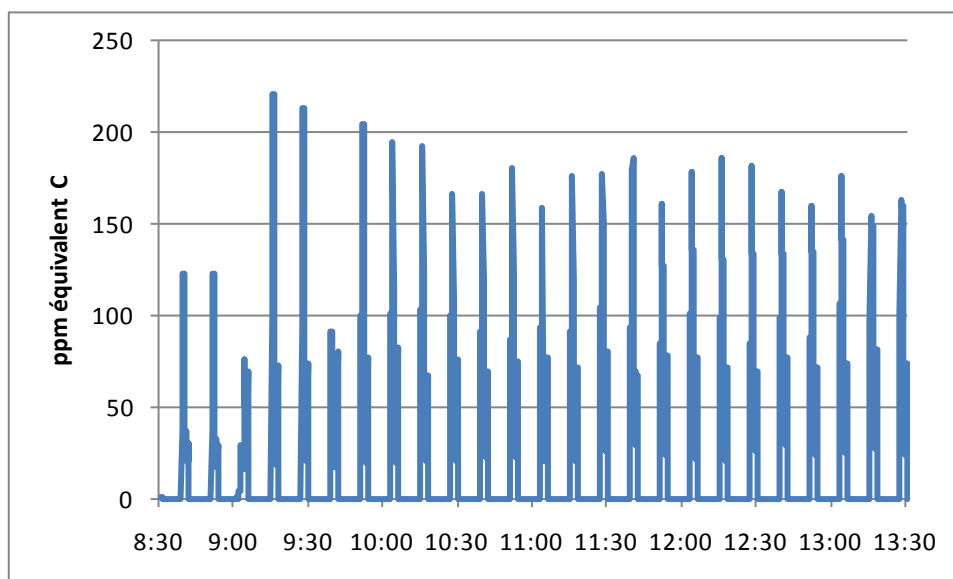
Les teneurs mesurées sont faibles. Sur plus d'une trentaine de substances potentiellement quantifiables, les résultats d'un bon nombre de COV sont inférieurs aux seuils de quantification de la méthode de mesure. Les principaux résultats sont présentés en annexe 2. Les émissions de COV suivent globalement l'évolution des émissions de CO.

Pour les chaudières au gaz, les émissions à allure nominale sont les plus faibles, c'est donc à cette allure que les conditions de réalisation d'une bonne combustion sont les plus favorables.

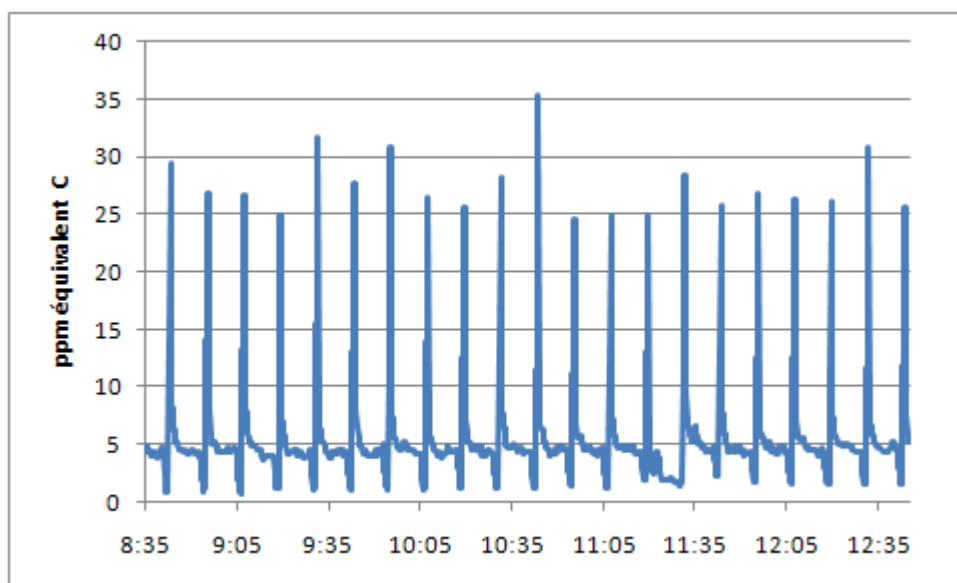
Pour les COV totaux, la chaudière BT murale récente génère la plus grande partie des émissions ce qui est probablement lié à un problème au niveau de la conception de cette chaudière.

Les émissions à allure dégradée sont très supérieures aux émissions à allure nominale. En effet, des pics d'émission (cf. graphes 2 et 3) sont constatés à chaque démarrage de chaudière.

Graphe 2 : Exemple d'évolution de la teneur en COVt à allure dégradée (chaudière gaz condensation murale récente)



Graphe 3 : Exemple d'évolution de la teneur en COVt à allure dégradée (chaudière fioul BT sol récente)



16 HAP

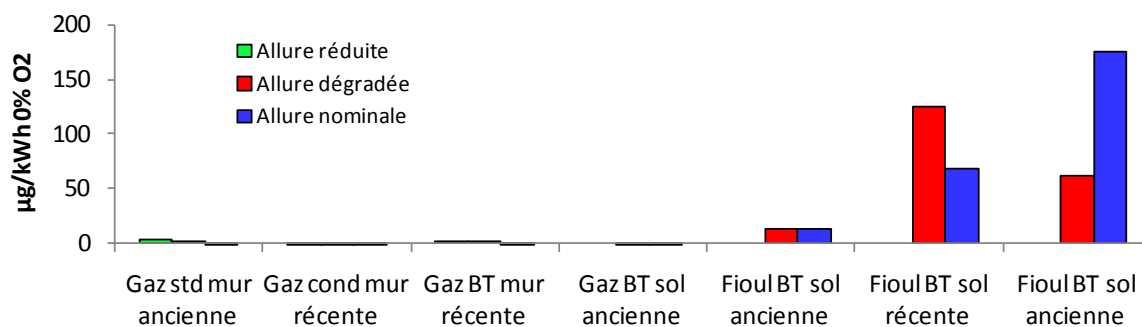


Figure 6 : Facteurs d'émission de HAP (16 éléments) par allure et par type de chaudière

Les émissions de HAP des chaudières au gaz sont négligeables si on les compare aux émissions des chaudières au fioul.

Les chaudières au fioul émettent à allure nominale et dégradée.

Les HAP sont essentiellement générés par deux chaudières au fioul BT au sol, l'une récente, l'autre ancienne. Les émissions de HAP suivent globalement l'évolution des émissions de CO.

PCDD/PCDF

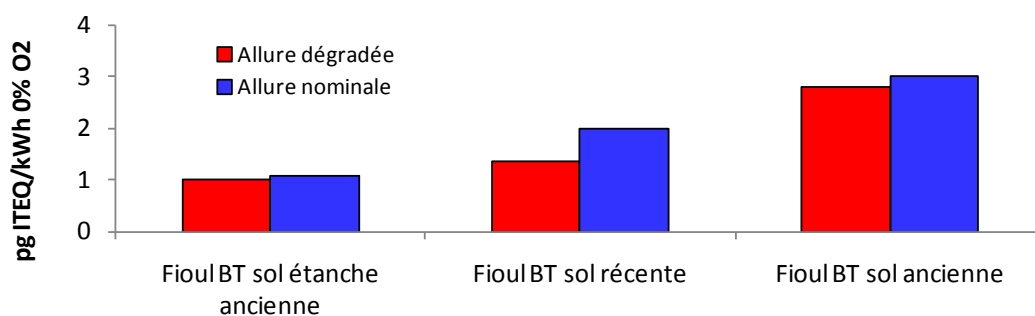


Figure 7 : Facteurs d'émission de dioxines et furanes par allure et par type de chaudière

Les émissions sont légèrement supérieures à allure nominale et suivent l'évolution des émissions de CO.

Commentaires généraux sur les polluants

Le nombre de chaudières testées n'est pas suffisant pour tirer des enseignements et des règles définitives mais les résultats permettent de faire néanmoins quelques constats :

- les NO_x sont les polluants dont les niveaux d'émission varient peu, pour une chaudière donnée, d'une allure à une autre. Pour les trois chaudières au fioul, les émissions des PCDD/PCDF sont également relativement stables,
- pour une grande partie des chaudières, les émissions de COV totaux, HAP et PCDD/PCDF suivent souvent l'évolution des émissions de CO, ce qui est logique dans la mesure où ils sont dus à une combustion incomplète,
- on remarque que davantage que l'âge de la chaudière c'est plutôt la conception de la chaudière et la technologie de brûleur employée qui jouent un rôle fondamental quant aux émissions de polluants,
- la chaudière à condensation qui dispose de la technologie la plus récente se distingue comme étant la chaudière qui émet le moins de polluants, quelle que soit l'allure.

6.2.3 COMPARAISON AVEC D'AUTRES DONNEES FRANÇAISES

Le CETIAT³ a effectué une recherche bibliographique à partir d'études réalisées de 1990 à 1996 afin d'établir un tableau de référence dans lequel les valeurs des émissions de NO_x de chaudières au gaz et au fioul sont exprimées en fonction des technologies de brûleurs. Cette recherche a eu lieu dans le cadre de l'entretien annuel des chaudières. La Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) au Ministère en charge de l'environnement souhaite à présent imposer une mesure des émissions de NO_x tous les 2 ans. C'est seulement depuis l'année 2000 que l'entrée en vigueur des normes européennes a permis d'établir des classes d'émissions de NO_x des chaudières gaz et fioul. Les facteurs d'émission en NO_x des essais sur banc ont été comparés avec les valeurs obtenues lors de cette étude bibliographique.

Les paramètres augmentant la production de NO_x sont :

- la température élevée de la flamme,

- l'excès d'air c'est-à-dire la présence importante d'oxygène n'ayant pas réagi dans les fumées. Un excès d'air important entraîne une plus grande formation de NO_x. Ce paramètre et celui qui précède dépendent de la conception du brûleur,
- le temps de séjour des atomes d'azote dans la zone chaude de la flamme qui dépend de la conception de la chaudière,
- la concentration du combustible en N₂.

Le tableau 11 présente les résultats des teneurs en NO_x émis lors des essais sur banc ainsi que les brûleurs respectifs de chaque chaudière testée. L'allure nominale seule est prise en considération pour ces comparaisons car les données issues de la littérature relatives à ces polluants ne sont disponibles qu'à cette allure.

Tableau 11 : Facteurs d'émission de NO_x issues des données sur banc pour les chaudières au gaz et au fioul

Chaudière	Facteurs d'émission (mg/kWh à 0% d'O ₂)	Brûleur
Gaz standard murale ancienne	330,2	à rampe atmosphérique
Gaz à condensation murale étanche récente	65,3	atmosphérique à prémélange total
Gaz BT murale récente	188,2	atmosphérique
Gaz BT au sol ancienne	74,5	à air soufflé
Fioul BT au sol étanche ancienne	178,2	à flamme jaune
Fioul BT au sol récente	168,4	à flamme jaune
Fioul BT au sol ancienne	187,2	à flamme jaune

Pour les chaudières au gaz, le tableau 12 présente les données recueillies dans la littérature par le CETIAT (plage d'émission de polluants) et les facteurs d'émission en NO_x déterminés lors des essais sur banc. Ce tableau permet de comparer les plages d'émissions établies avec les émissions de NO_x qui ont été mesurées lors des essais sur banc à allure nominale.

Tableau 12 : Emissions de NO_x des chaudières gaz en fonction des technologies de brûleurs (valeurs en mg/kWh à 0% d'O₂)

Brûleur	Produit disponible	Chaudière	Plage d'émission de NO _x	Correspondance chaudière essai sur banc	Facteur d'émission NO _x
chaudières anciennes	depuis 1980	standard	210 - 380	standard murale ancienne	330,2
atmosphérique	depuis 1989/1990	standard	170 - 210	BT murale récente	188,2
à air soufflé	depuis 1985	standard/BT/condensation	120 - 160	BT au sol ancienne	74,5
atmosphérique à prémélange total	depuis 1989/1990	standard/BT/condensation	30 - 70	à condensation murale étanche récente	65,3

Pour les chaudières au fioul, le tableau 13 présente les données recueillies dans la littérature par le CETIAT (plage d'émission de polluants) et les facteurs d'émission en NO_x déterminés lors des essais sur banc. Ce tableau permet de comparer les plages d'émissions établies avec les émissions de NO_x qui ont été mesurées lors des essais sur banc en allure nominale.

Tableau 13 : Emissions de NO_x des chaudières gaz en fonction des technologies de brûleurs (valeurs en mg/kWh à 0% d'O₂)

Brûleur	Produit disponible	Chaudière	Plage d'émission de NO _x	Correspondance chaudière essai sur banc	Facteur d'émission NO _x
à flamme jaune avec pulvérisation	depuis 1989/1990	standard	150 - 200	BT au sol étanche ancienne	178,2
				BT au sol récente	168,4
				BT au sol ancienne	187,2

Nous remarquons que les valeurs d'émission en NO_x des 7 chaudières testées sur banc se situent à l'intérieur de la plage des concentrations émises (données établies par le CETIAT). Une seule valeur d'émission est inférieure à la borne inférieure de ces plages d'émissions. Donc nos résultats confortent ceux du CETIAT.

Nous pouvons également constater que d'après les données du CETIAT établies sur un nombre de mesures plus important et donc plus représentatif du parc français, les technologies anciennes au gaz émettent plus de NO_x que les récentes. Ceci est essentiellement dû au type de brûleur mais également à la technologie de la chaudière utilisée. Par contre, pour les chaudières au fioul qui possèdent le même type de brûleur mais des technologies différentes, les valeurs d'émissions en NO_x varient très peu. Les émissions de NO_x des chaudières gaz et fioul sont liées physiquement à la technologie de brûleur employée.

6.3 COMPARAISON DES RESULTATS DES ESSAIS SUR SITE ET SUR BANC

D'après les résultats de NO_x et de CO exprimés en mg/kWh à 0% O₂ obtenus sur site et sur banc, une comparaison a été effectuée pour trois types de chaudières communes à ces essais. Les valeurs obtenues à allure nominale lors des essais sur banc ont été comparées aux valeurs obtenues lors des essais sur site.

Dans les tableaux 14 et 15, les résultats obtenus sur des chaudières de mêmes technologies testées lors des essais sur banc et sur site sont présentées.

Tableau 14 : Essais sur banc à allure nominale

Type de chaudière	NO _x (mg/kWh à 0% d'O ₂)	CO (mg/kWh à 0% d'O ₂)
Gaz standard murale ancienne	330,2	116,9
Gaz condensation murale étanche récente	65,3	71,6
Fioul BT au sol ancienne	178,2	13,2
Fioul BT au sol récente	168,4	61,5
Fioul BT au sol ancienne	187,2	93,9

Tableau 15 : Essais sur site

Type de chaudière	NO _x (mg/kWh à 0% d'O ₂)	CO (mg/kWh à 0% d'O ₂)
Gaz standard au sol ancienne (1990)	203,3	39,9
Gaz à condensation murale étanche récente (2007)	26,7	30,8
Gaz à condensation murale étanche récente (2007)	20,2	13,8
Fioul BT ancienne	172	24

La chaudière standard murale au gaz testée lors des essais sur banc étant un modèle très ancien, elle émet plus de NO_x et de CO que la chaudière standard au sol sur site.

La différence des valeurs en NO_x entre les chaudières à condensation sur site et sur banc qui sont toutes trois récentes peut s'expliquer par la technologie du brûleur employé et par la différence des protocoles d'essais. En effet, sur banc, les essais sont faits à allure nominale en continu alors que sur site, l'allure est discontinue car elle correspond à un fonctionnement en mode régulation, fonction de la demande en chauffage et pas nécessairement à l'allure nominale non plus.

Globalement, les émissions de CO des chaudières à condensation sont également plus faibles sur site. Pour les chaudières au fioul, les différences d'émissions de NO_x sont très faibles.

7. COMMENTAIRES / CONCLUSIONS

Le groupe de chaudières testées lors de ces essais a été choisi en raison de son caractère représentatif du parc français. Le programme d'essais établi a eu pour objectif, lors des essais sur site, d'évaluer le comportement réel d'une chaudière. A partir des observations effectuées, des essais sur banc, respectant le cadre normatif relatif à ce type d'essais ont été menés aux allures de fonctionnement réelles des chaudières afin d'obtenir les facteurs d'émissions les plus représentatifs de la réalité.

Le nombre de chaudières testées n'est pas suffisant pour tirer des enseignements et des règles définitives mais les résultats trouvés permettent de faire néanmoins quelques constats :

- on remarque que davantage que l'âge de la chaudière, c'est plutôt la conception de la chaudière et notamment celle de son brûleur qui joue un rôle fondamental dans l'émission de polluants,
- la comparaison des résultats entre les essais sur site et sur banc a permis de constater que les émissions de NO_x et de CO générées lors des essais sur site (dans les conditions réelles de fonctionnement des chaudières) étaient du même ordre de grandeur (compte tenu des fluctuations habituellement observées au sein d'une même catégorie de chaudières) que celles générées lors des essais sur banc,
- en ce qui concerne les émissions des COV, les résultats obtenus à allure dite dégradée, considérée comme plus représentative des conditions réelles de fonctionnement de ces installations, sont bien supérieurs à ceux des essais effectués à allure nominale. Pour d'autres polluants, tels que les PM ou les HAP, des écarts importants entre ces deux allures sont également parfois constatés sur certaines chaudières,
- l'exploitation des résultats montre que la dépendance des polluants, les uns par rapport aux autres, est difficile à mettre en évidence (pas de corrélation constatée) du fait probablement du comportement propre à chaque appareil,
- les chaudières au fioul génèrent davantage de particules et de HAP que les chaudières au gaz,
- concernant les chaudières au gaz :
 - l'allure réduite est celle qui génère la plus grande pollution (hors NO_x),
 - la chaudière à gaz à condensation murale étanche récente est la moins émettrice en polluants. Les performances de cette chaudière sont par ailleurs à peu près maintenues quelle que soit l'allure (hors COV à allure dégradée). L'achat des chaudières à condensation est favorisé en France par rapport aux autres technologies par un taux de crédit d'impôt supérieur (cf. annexe 4). En effet, ces chaudières permettent des économies d'énergie mais aussi, comme on a pu le constater une meilleure préservation de l'environnement.

8. BIBLIOGRAPHIE

¹ René Kenna, Martijn van Elburg, William Li, Rob van Holsteijn, 2007. Preparatory Study on Eco-design of Boilers. Task 2 (FINAL) Market Analysis

² René Kenna, Martijn van Elburg, William Li, Rob van Holsteijn, 2007. Preparatory Study on Eco-design of Boilers. Task 1 (FINAL) Definition, Test Standards, Current Legislation and Measures

³ Valeurs d'émissions de NO_x des chaudières gaz et fioul - données CETIAT pour l'élaboration de l'arrêté ministériel des chaudières de 4 à 400 kW

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Dépouillement des données – Caractéristiques des combustibles utilisés lors des essais sur banc	3
Annexe 2	Résultats des mesures de COV	3
Annexe 3	Calcul d'un facteur d'émission en SO ₂ pour les chaudières au fioul	2
Annexe 4	Textes normatifs qui s'appliquent aux chaudières	3
Annexe 5	Description des méthodes de mesures mises en œuvre	5
Annexe 6	Incertitudes associées aux mesures effectuées	3
Annexe 7	Facteurs d'émission en polluants (résultats exprimés en g/GJ d'énergie entrante)	4

ANNEXE 1

Dépouillement des données sur site et sur banc Caractéristiques des combustibles utilisés lors des essais sur banc

1- Détermination des facteurs d'émission lors des essais sur site :

Après avoir corrigé les concentrations en O₂, CO₂, NO_x et CO, il est possible de déterminer les facteurs d'émissions en CO et NO_x de la façon suivante :

Cas du gaz :

Les données relatives au gaz utilisées pour les calculs des facteurs d'émissions sont extraites de la littérature concernant le gaz de Groningue :

- le pouvoir fumigène : V₀ en Nm³/kg (volume sec (c'est-à-dire sans vapeur d'eau) des produits de la combustion complète, effectuée avec le comburant théorique du volume de combustible ou de l'unité de masse).
- le pouvoir comburivore : V_a en Nm³/kg (volume de comburant (ici l'air) juste nécessaire pour produire la combustion complète du volume de combustible ou de l'unité de masse).
- le CO_{2N} neutre ou stœchiométrique : en % ; où sur site il vaut : [CO₂]_{mesurée} * e
- le PCI en kJ/kg.

Excès d'air (e) : exprime la quantité d'air en excès par rapport à la quantité d'air minimum nécessaire à une combustion complète.

$$e = (21\%) / (21\% - [\text{O}_2]_{\text{mesuré}} \text{ en } \%) = [\text{CO}_{2N}] / [\text{CO}_2]_{\text{mesuré}}$$

$$[\text{NO}_x] \text{ en ppm à } 0\% \text{ d'O}_2 = [\text{NO}_x]_{\text{mesurée}} * \text{excès d'air}$$

$$[\text{NO}_x] \text{ en mg/kJ à } 0\% \text{ d'O}_2 = ([\text{NO}_x]_{\text{ppm à } 0\% \text{ O}_2} * (M_{\text{NO}_2} / V_M) * (V_0 / V_a) * V_a) / \text{PCI}$$

$$[\text{NO}_x] \text{ en mg/kWh à } 0\% \text{ d'O}_2 = [\text{NO}_x] \text{ en mg/kJ à } 0\% \text{ d'O}_2 * 3600$$

$$[\text{CO}] \text{ en ppm à } 0\% \text{ d'O}_2 = [\text{CO}]_{\text{mesurée}} * \text{excès d'air}$$

$$[\text{CO}] \text{ en mg/Kj à } 0\% \text{ d'O}_2 = ([\text{CO}]_{\text{ppm à } 0\% \text{ O}_2} * (M_{\text{CO}} / V_M) * (V_0 / V_a) * (V_a)) / \text{PCI}$$

$$[\text{CO}] \text{ en mg/kWh à } 0\% \text{ d'O}_2 = [\text{CO}] \text{ en mg/Kj à } 0\% \text{ d'O}_2 * 3600$$

Cas du fioul :

De même que pour les gaz, les données nécessaires à la détermination des facteurs d'émissions sont issues de la littérature concernant le fioul domestique.

$$[\text{CO}] \text{ ppm à } 0\% \text{ O}_2 = [\text{CO}]_{\text{mesuré}} * ([\text{CO}_2]_N / [\text{CO}_2]_{\text{mesuré}})$$

$$[\text{CO}] \text{ mg/kWh } 0\% \text{ O}_2 = ([\text{CO}]_{\text{ppm } 0\% \text{ O}_2} * (M_{\text{CO}} / V_M) * (V_0 / V_a) * V_a * 3600) / \text{PCI}$$

$$[\text{NO}_x] \text{ ppm à } 0\% \text{ O}_2 = [\text{NO}_x]_{\text{mesuré}} * ([\text{CO}_2]_N / [\text{CO}_2]_{\text{mesuré}})$$

$$[\text{NO}_x] \text{ mg/kWh à } 0\% \text{ O}_2 = ([\text{NO}_x]_{\text{ppm } 0\% \text{ O}_2} * (M_{\text{NO}_2} / V_M) * (V_0 / V_a) * V_a * 3600) / \text{PCI}$$

2- Détermination des facteurs d'émission lors des essais sur banc :

A la différence des essais sur site les caractéristiques des combustibles ont été mesurées en continu lors du fonctionnement des chaudières (cf. tableaux 1 et 2 ci-dessous). Les démarches de dépouillement et de calcul des facteurs d'émissions sont les mêmes.

Cas du gaz :

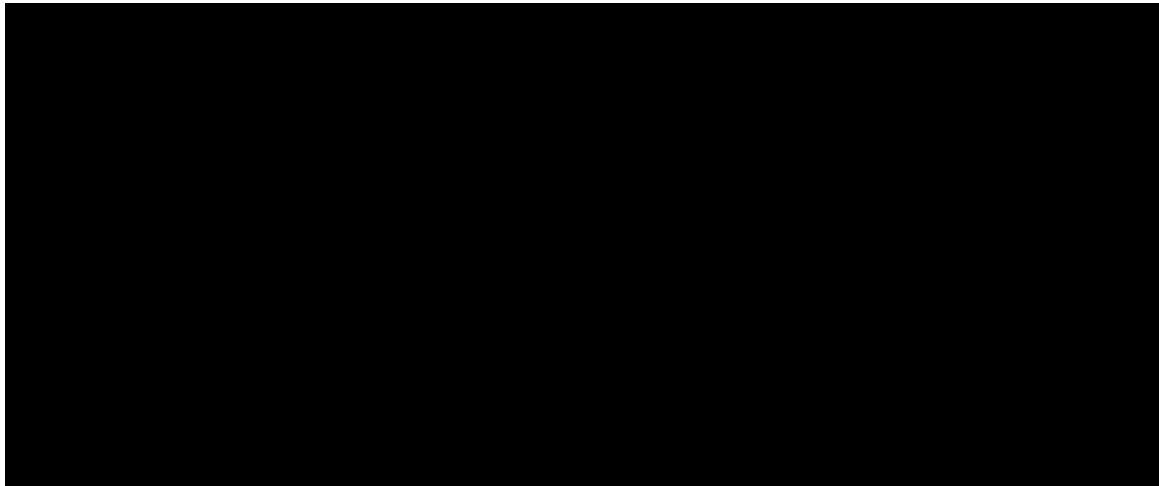
Tableau 1 : Données recueillies lors des essais sur banc pour les chaudières au gaz

A large black rectangular area that has been redacted, covering the content of Tableau 1.

Cas du fioul :

Les caractéristiques du fioul suivantes ont été mesurées : CO_2 stœchiométrique en % ; V_0 et V_a en Nm^3/kg ; et le PCI en kJ/kg .

Tableau 2 : Données recueillies lors des essais sur banc pour les chaudières au fioul

A large black rectangular area that has been redacted, covering the content of Tableau 2.

ANNEXE 2
Résultats des mesures des COV

Facteurs d'émissions des COV mesurés lors des essais sur banc (essais effectués sur des chaudières gaz)

Chaudière gaz	standard murale ancienne			cond. murale étanche récente			BT murale étanche réc.		BT sol ancienne	
	nominale	dégradée	réduite	nominale	dégradée	réduite	nominale	dégradée	nominale	dégradée
Unité	µg/kWh à 0% d'O ₂									
éthane	18,9	648	2922	3,3	933	<0,1	2777	3734	143	1416
propane	7,4	222	374	7,6	629	0,5	1237	1875	57	335
n-butane	5,5	48,2	63	2,4	132	0,2	297	435	14,3	76
n-pentane	4,6	14,8	24,8	1,5	29,3	<0,4	81	119	5,1	22,4
iso-butane	3,0	52	74	2,2	166	0,7	372	526	17,8	104
1,3-butadiène	<0,1	<0,1	2,2	0,2	0,4	<0,1	1,3	1,2	<0,1	0,5
benzène	2,8	26,2	19,0	2,6	4,2	0,8	47,6	41,5	7,6	5,2
toluène	18,5	18,1	58	82	12,1	17,4	37,7	21,6	90	11,6
éthylbenzène	3,2	2,7	12,4	0,9	1,3	<0,6	2,5	3,7	1,0	3,1
m+p-xylène	12,5	9,3	44	5,6	5,9	1,4	6,8	13,0	4,1	16,2
o-xylène	3,7	3,1	15,3	1,3	1,7	<0,6	2,0	3,7	1,5	5,5
1,3,5-triméthylbenzène	2,5	2,1	10,2	6,7	1,7	<0,7	2,8	2,3	1,3	6,8
1,2,4-triméthylbenzène	5,8	6,4	32,8	3,2	5,6	1,2	7,1	8,9	4,1	16,1
1,2,3-triméthylbenzène	5,1	5,2	21,9	13,6	4,8	3,3	5,8	7,5	4,5	12,6
Somme	93	1057	3674	133	1927	26	4878	6792	351	2030
Somme des COV dosés	137	1097	4226	157	2061	31	5282	7347	376	2134

La somme des COV dosés représente la somme de l'ensemble des COV identifiés et dosés (certains de ces composés ne sont pas mentionnés dans la liste ci-dessus).

Facteurs d'émissions des COV mesurés lors des essais sur banc (essais effectués sur des chaudières fioul)

Chaudière fioul	BT sol ancienne		BT sol récente		BT sol ancienne	
	nominale	dégradée	nominale	dégradée	nominale	dégradée
Unité	µg/kWh à 0% d'O ₂					
éthane	<0,1	11,0	312,8	22,7	107,5	4,1
propane	<0,1	3,2	<0,1	4,2	3,7	4,5
propène ou propylène	1,7	3,8	371,0	476,5	81,5	104,2
iso-butane	<0,1	2,2	<0,1	1,0	1,0	1,7
n-butane	0,3	4,1	<0,1	2,5	3,7	5,1
1-butène	1,9	7,1	126,1	151,3	46,1	35,9
iso-pentane	0,8	12,0	61,6	74,2	7,6	9,5
n-pentane	<0,1	5,1	0,4	4,5	2,8	3,0
1,3-butadiène	<0,1	<0,3	4,5	3,8	1,8	<0,2
benzène	7,4	7,1	513,9	848,0	125,8	112,8
iso-octane ou 2.2.4-triméthylpentane	<1,5	3,6	15,0	11,1	8,5	8,0
n-heptane	<1,6	7,4	<0,6	42,1	6,4	5,1
toluène	11,8	22,1	158,5	325,2	44,1	60,5
n-octane	<1,5	18,7	5,6	115,8	51,1	11,3
éthylbenzène	<1,6	18,1	27,9	122,1	<2,2	23,9
m+p-xylène	<4,8	64,6	48,2	607,6	22,0	27,1
o-xylène	<1,5	24,2	26,6	208,7	14,1	16,7
n-nonane	<1,5	73,3	8,0	467,9	<2,2	36,7
1,3,5-triméthylbenzène	<2,1	81,5	14,3	415,5	<8,8	19,9
1,2,4-triméthylbenzène	<2,3	174,5	40,0	1662,6	<9,8	273,3
1,2,3-triméthylbenzène	<1,8	126,2	16,3	738,0	46,4	127,8
n-décane	<3,0	135,0	27,2	655,2	<9,8	32,5
Somme	24	805	1778	6961	574	923
Somme des COV dosés	27	825	1895	7114	611	947

La somme des COV dosés représente la somme de l'ensemble des COV identifiés et dosés (certains de ces composés ne sont pas mentionnés dans la liste ci-dessus).

ANNEXE 3

Calcul d'un facteur d'émission en SO₂ pour les chaudières au fioul

Calcul d'un facteur d'émission en SO₂ pour les chaudières fioul à partir de la teneur en soufre du combustible d'essai :

Données :

- teneur en soufre du combustible : 0.135%
- PCI : 42988 kJ/kg

$$[\text{SO}_2] \text{ g/kJ} = [\text{SO}_2] \text{ g/kg de fioul} / \text{PCI kJ/kg}$$

$$[\text{SO}_2] \text{ g/GJ} = 1,35/42988 \cdot 10^6 \times 64/32 = 62,8 \text{ g/GJ}$$

ANNEXE 4
Textes normatifs qui s'appliquent aux chaudières

Emissions de polluants lors de la combustion :

En ce qui concerne les exigences en matière d'émission sur les produits de combustion, la situation est peu claire, compte tenu du nombre important de normes applicables. La plupart des normes prescrivent des émissions maximum de CO comme une caractéristique de sécurité. Toutefois, pour NO_x, CO, SO₂, COV et les émissions particulaires pendant le fonctionnement normal, il semble que les VLE soient considérées comme informatives (voir tableaux n°1 et 2 ci-dessous). L'indication de la classe d'émissions de CO et de NO_x est obligatoire.

Tableau 1 : Chaudières au fioul

Appareils de chauffage au fioul	Norme	VLE				Remarques
		NOx	CO	COV	Indice de noircissement	
		mg/kWh 0% O ₂	mg/kWh 0% O ₂	ppm 0% O ₂		
Brûleur à fioul à air soufflé à pulvérisation	EN 267	classe 1: 250 classe 2: 185 classe 3: 120	classe 1: 110 classe 2: 110 classe 3: 60	10	≤1	
Chaudière avec brûleur à fioul à air soufflé à pulvérisation (assemblage du corps de chaudière-brûleur)	EN 303-2	250	110	10	≤1	S'applique aux chaudières visées par l'EN 303-1 jusqu'à une puissance de 1000 kW
Chaudière avec brûleur à fioul à air soufflé à pulvérisation (Unit : Chaudière équipé du brûleur d'origine)	EN 303-2	classe 1: 185 classe 2: 120 classe 3: 120	classe 1: 110 classe 2: 80 classe 3: 60	10	≤1	S'applique aux chaudières visées par l'EN 303-4 jusqu'à une puissance de 70 kW en concordance avec EN 267

Tableau 2 : Chaudières au gaz

Appareils de chauffage au gaz	Norme	VLE		Remarques	
		NOx			CO
		mg/kWh 0% O ₂			mg/kWh 0% O ₂
Brûleurs à air soufflé pour combustibles gazeux	EN676	Classe 1 : 170* Classe 2 : 120* Classe 3 : 80*	Classe 1 : 230** Classe 2 : 180** Classe 3 : 140**	100	*pour les gaz de la deuxième famille ** pour les gaz de la troisième famille
Chaudière gaz avec brûleur à air soufflé pour combustibles gazeux	EN 303-3				
Chaudière gaz équipée avec brûleur atmosphérique	EN297 EN483	Classe 1 : 260 Classe 2 : 200 Classe 3 : 150 Classe 4 : 100 Classe 5 : 70			S'applique si le débit calorifique nominal est ≤70 kW
Chaudière à condensation	EN677				

En conclusion, il existe de nombreux chevauchements de normes pour les différents types de chaudières et/ou parties de chaudières qui rendent l'application de ces textes peu claire. Les valeurs limites d'émission (VLE) pour les NO_x et les émissions de CO sont encore rares.

En 2000, la Réglementation Thermique (RT2000) a été adoptée. Elle est basée sur des calculs de perte de chaleur et de crédits pour l'installation des composants. Une nouvelle RT2005 a été adoptée en 2005. Même si elle contient plusieurs nouveaux éléments, elle est similaire à la RT 2000, en ce qui concerne la méthodologie de chauffage des locaux.

L'actuelle RT2005 impose au constructeur de déclarer le rendement du générateur de chaleur à des charges de 30% et 100%. Pour les chaudières fioul et gaz, ce chiffre de rendement peut être déterminé à partir d'essais de marquage CE. Si aucune valeur n'est connue, la RT2005 accepte les valeurs minimales de la directive des chaudières de l'UE par défaut. Par défaut, la température minimum de retour par types de chaudières est de 45, 35 et 20 °C respectivement pour les chaudières standard, à basse température et à condensation.

Pour les chaudières à basse température, le taux de crédit d'impôt est fixé à 15 %; et 25% pour les chaudières à condensation. Ce taux est porté à 40 % pour les chaudières à condensation si ces chaudières sont installées dans un logement achevé avant le 1 janvier 1977.

ANNEXE 5
**Description des méthodes de mesures mises en
œuvre**

L'INERIS est agréé par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM) pour effectuer certains types de prélèvements et d'analyses à l'émission des substances dans l'atmosphère.

Par ailleurs, l'INERIS est accrédité par la section Essais du COFRAC pour son unité technique : Direction des Risques Chroniques au titre du programme 97 : Essais et analyses des polluants à l'émission et dans l'air ambiant. Enfin l'institut est certifié ISO 9001.

Le tableau ci-dessous regroupe tous les paramètres suivis, les principes de mesures utilisés et les normes de référence.

Paramètre	Principe	Référence normative
Mesurages en continu au moyen d'analyseurs automatiques		
O ₂	Paramagnétisme	X 20-377 + X 43-300
CO ₂	Infra-rouge non dispersif	NF X 20-380 + X 43-300
CO	Infra-rouge non dispersif	NF X 43-012 + X 43-300
NOx (NO et NO ₂)	Chimiluminescence	NF X 43-018 + X 43-300
COV Totaux	Méthode par ionisation de flamme	NF EN 12619
Mesurages par méthodes manuelles		
Poussières	Piégeage sur filtre - méthode gravimétrique	NF EN 13284-1
HAP	Piégeage sur filtre et sur adsorbant solide	NF X 43-329
Dioxines et furanes	Piégeage sur filtre et sur adsorbant solide	NF EN 1948
Humidité	Condensation et absorption	NF EN 14790
Température	Thermocouple K	-
COV spécifiques	Prélèvement en canister - Analyse par chromatographie	EPA TO 14 et 15

- Méthode de mesurage en continu au moyen d'un analyseur automatique

- Mesurages de O₂, CO, CO₂, NOx.

L'échantillon d'effluent gazeux a été prélevé au moyen d'une pompe étanche fonctionnant à un débit d'au moins 5 l/min. Les gaz ont été filtrés à l'aide d'un filtre chauffé en céramique puis la vapeur d'eau a été condensée dans un système de refroidissement afin d'abaisser le point de rosée des gaz humides et éviter ainsi la condensation dans l'analyseur. Une partie du gaz (représentant environ 50% du débit total) passe dans la chaîne d'analyse. Les concentrations en gaz sont donc exprimées par rapport au gaz sec.

- Mesurage des COV totaux

Les COV totaux ont été prélevés et analysés en continu. L'échantillon est prélevé au moyen d'une ligne chauffée maintenue à une température de 150°C. Un analyseur fonctionnant suivant le principe de l'ionisation de flamme a été utilisé.

Note : Le gaz de zéro et le gaz de point d'échelle ont été injectés en tête de ligne au début et à la fin de la période de mesurage. Si une dérive significative (> 2%) du zéro et de la sensibilité sont constatées au cours de l'essai, les données brutes correspondantes ont fait l'objet d'une correction linéaire.

- Méthode manuelle de mesurage

- Mesurage de la température

La température des gaz dans le conduit est déterminée au moyen d'un thermocouple K.

- Mesurage de l'humidité

L'humidité est mesurée par gravimétrie après condensation et absorption de l'effluent gazeux.

- Mesurage discontinu de HAP

Pour les HAP, le protocole de mesurage selon la norme française NF X 43-329 a été utilisé. Cette norme prend en compte 8 composés, jugés représentatifs de la famille des HAP. Il s'agit de composés de poids moléculaires élevés reconnus comme étant pour la plupart cancérigènes. Huit autres composés ont également fait l'objet de dosage suivant le même protocole de mesure.

Les résultats ont été exprimés en trois listes :

- liste des 16 HAP* dosés (liste EPA),
- liste des 8 HAP** de la norme française,
- liste des 4 HAP*** retenus dans le cadre de l'inventaire national des émissions.

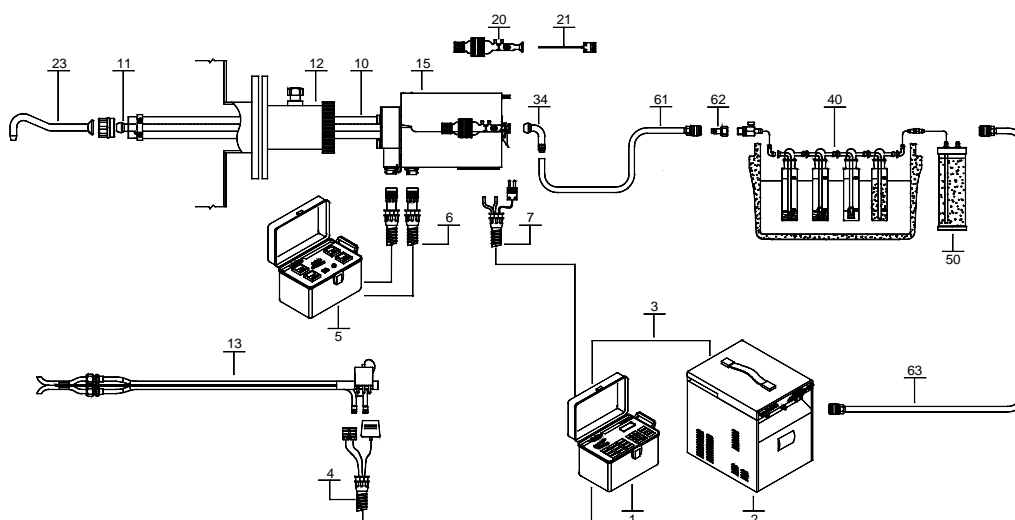
Les HAP se répartissent dans une phase particulaire et une phase gazeuse. La phase particulaire est piégée sur le filtre et la phase gazeuse sur la résine et éventuellement dans les condensats.

*Naphtalène, Acénaphthylène, Acénaphène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo (a) anthracène, Chrysène, Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Dibenzo (a,h) anthracène, Benzo (g,h,i) pérylène, Indeno (1,2,3-c,d) pyrène.

**Fluoranthène, Benzo (a) anthracène, Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Dibenzo (a,h) anthracène, Benzo (g,h,i) pérylène, Indeno (1,2,3-c,d) pyrène.

***Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Indeno (1, 2, 3-c,d) pyrène.

Le dispositif de prélèvement des HAP est présenté dans la figure ci-après.



La méthodologie mise en œuvre est la suivante :

- l'échantillon est prélevé hors du conduit, sans dérivation grâce à un ensemble complet de prélèvement en verre comprenant une sonde et un filtre plan en fibre de quartz, hors du conduit, maintenus à une température de 125°C, un condenseur, un pot à condensats et une cartouche remplie de résine préalablement conditionnée,
- le volume de gaz échantillonné est déterminé au moyen d'un compteur à gaz sec,
- les différents composants du système de prélèvement : filtre, condensats, résine et solvants de rinçage de la sonde, du porte-filtre, du réfrigérant et du pot à condensats sont collectés et traités en laboratoire,
- les échantillons solides (filtre, résine) sont extraits au Soxhlet (pièce de verrerie qui permet de faire l'extraction continue par solvant d'une espèce chimique contenue dans une poudre solide) au dichlorométhane (DCM) ; les échantillons aqueux sont traités par extraction liquide-liquide avec du DCM. Les divers extraits sont rassemblés et concentrés sous flux d'azote,
- l'analyse quantitative est effectuée par étalonnage externe au moyen d'un chromatographe en phase liquide haute performance (HPLC/FLD) équipé d'un détecteur fluorescent.

- Mesurage en discontinu des dioxines et furanes (PCDD/PCDF)

La méthode de mesurage des PCDD/PCDF est similaire à celle des HAP. Les différents composants du système de prélèvement sont collectés et traités en laboratoire. Les résines ont été dopées avant prélèvement par 1 ng de ³⁷Cl-2, 3, 7, 8-TCDD. Les échantillons solides sont extraits au Soxhlet au DCM et, les échantillons aqueux sont traités par extraction liquide-liquide avec du DCM. Ils sont ensuite réunis et concentrés. On adjoint à l'ensemble, une solution de 13 congénères étalons marqués au carbone-13 de concentrations connues. Avant de procéder à la mesure des PCDD et PCDF, on ajoute une solution de deux congénères étalons internes marqués au carbone-13 qui permettront de calculer les taux de récupération des étalons marqués au carbone-13.

L'analyse quantitative est effectuée par couplage chromatographie gazeuse capillaire et spectrométrie de masse haute résolution. Les 17 congénères dont les atomes de chlore occupent les positions 2, 3, 7 et 8 sont pris en compte pour le calcul de la toxicité équivalente exprimée en 2, 3, 7, 8-TCDD. Ils sont mesurés et quantifiés par rapport à leurs homologues marqués au carbone-13.

- Mesurage des COV par spécifiques

Le prélèvement a lieu à pression atmosphérique après refroidissement des fumées. Le canister préalablement mis en dépression se remplit lors de l'ouverture de la vanne soit en prélèvement d'une heure à l'aide d'un débitmètre, soit sans débitmètre en prélèvement rapide.

Les canisters sont ensuite transférés au laboratoire où ils ont été analysés. Les méthodes suivantes ont été appliquées : séparation des composés par chromatographie en phase gazeuse et détection par un détecteur FID ; une analyse complémentaire a été réalisée en spectrométrie de masse de manière à rechercher la nature des composés présents dans l'échantillon.

- Mesurage de la teneur en poussières totales et fines par impacteur

L'impacteur est un appareil permettant d'impacter les particules émises sur les membranes qui le composent selon le diamètre des particules.

Composition de l'impacteur en partant du haut vers le bas : 3 filtres de petite tailles piégeant les particules de diamètre respectivement $< 10 \mu\text{m}$, $< 2,5 \mu\text{m}$, $< 1 \mu\text{m}$ et un grand filtre piégeant les particules de diamètre $> 10 \mu\text{m}$.

Pour faire le blanc de l'impacteur, 4 membranes témoins sont disposées sur le terrain dans le montage sans faire de prélèvement ; elles sont ensuite enlevées de l'impacteur. La différence de poids des membranes avant et après mise en place dans l'impacteur est mesurée afin de s'affranchir des particules ambiantes qui pourraient fausser les résultats.

ANNEXE 6
Incertitudes associées aux mesures effectuées

Les intervalles de confiance associés aux résultats des mesures sont présentés ci-après.

Les incertitudes associées aux facteurs d'émission déterminés, exprimés en (m)g/GJ, seront du même ordre de grandeur que les intervalles de confiance associés aux résultats des mesures étant donné que les incertitudes associées à V_o , V_a et PCI seront considérées comme plutôt faibles en regard des incertitudes associées aux résultats de mesures (cf. méthode de détermination des facteurs d'émission en annexe 1).

INERIS	INTERVALLES DE CONFIANCE LIES AUX RESULTATS DE MESURE			
Attention : au-delà du 23/11/2008, vérifier à l'aide du réseau, la validité du présent document papier.				
Nota : ce document a été émis et est géré par EMIS				
Les intervalles de confiance de reproductibilité I_{CR} sont calculés selon la norme NF X 43-331 : $I_{CR} = t \times S_R$ à 95 % de niveau de confiance (t : t de Student).				
A tout résultat de mesure sera attaché un intervalle de confiance sous la forme $y \pm I_{CR}$				
INDICES PONDÉRAUX SELON NFX 44-052 ET NF EN 13284-1 (Doc Intercomparaison et NF EN13284-1)				
Concentration en mg/m^3	2,5	6,4	10 à 30	30 à 75
Intervalle de confiance en % de la concentration	104	89	34	24
MESURES DE COVT SELON NF EN 13526 ET NF EN 12619				
Concentration en mg/m^3	<1	1 à 5	5 à 10	10 à 20
Intervalle de confiance en % de la concentration	200	50	30	20
MESURES DE CONCENTRATIONS EN MERCURE SELON NF EN 13211 (Doc NF EN 13211)				
Concentration en $\mu g/m^3$	4 à 10		40 à 100	
Intervalle de confiance en % de la concentration	44		25	
MESURES DE CONCENTRATIONS EN HCl SELON NF EN 1911 (Doc NF EN1911)				
Concentration en mg/m^3	0,08	5	40	
Intervalle de confiance en % de la concentration	200	30	5	
MESURES DE CONCENTRATIONS EN PCDD/PCDF SELON NF EN 1948 (Doc NF EN 1948)				
Concentration en ng I-TEQ/ m^3	0,035		12	
Intervalle de confiance en % de la concentration	140		35,8	
MESURES DE CONCENTRATIONS EN HAP SELON NFX 43-329 (DRC-01-23721-AIRE-685-JPo)				
Composé	Concentrations en $\mu g/m^3 \cdot h$	Intervalle de confiance en $\mu g/m^3 \cdot h$		
Fluoranthène	30 - 1050	$I_{CR} = 0.0006C^2 - 0.1266C + 56.678$		
Indéno (1,2,3-c,d) pyrène	5 - 150	$I_{CR} = 0.006C^2 + 0.4966C + 5.4468$		
Benzo (g,h,i) pérylène	5 - 100	$I_{CR} = 0.0048C^2 + 0.7150C + 0.7014$		
Dibenzo (a,h) anthracène	1 - 25	$I_{CR} = 0.4076C + 4.2936$		
Benzo (a) pyrène	5 - 300	$I_{CR} = 0.2908C + 23.45$		
Benzo (k) fluoranthène	3 - 250	$I_{CR} = 0.0082C^2 + 0.8554C + 30.948$		
Benzo (b) fluoranthène	5 - 800	$I_{CR} = 0.0004C^2 + 0.9582C - 7.566$		
Benzo (a) anthracène	10 - 250	$I_{CR} = 0.0018C^2 + 0.2772C + 13.691$		
MESURES DE CONCENTRATIONS EN HF SELON NFX 43-304				
Concentration en mg/m^3 équivt HF	5			
Intervalle de confiance en % de la concentration	30			

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée

MESURES DE CONCENTRATIONS EN NOx PAR ANALYSEURS À CHIMILUMINESCENCE SELON NF EN 14792
 $I_{CR}(C) = 0,038 C + 4,4$ en mg/m^3

Concentration en mg/m^3 équivt NO_2	50	100	> 200
Intervalle de confiance en % de la concentration	13	8,3	4,2

MESURES DE CONCENTRATIONS EN CO PAR ANALYSEURS À ABSORPTION INFRA-ROUGE SELON PR EN 15058
 $I_{CR}(C) = 0,029 C + 7,2$ en mg/m^3 ;

Concentration en mg/m^3	5 – 15	50	80	> 200
Intervalle de confiance en % de la concentration	150 – 51	17	12	6

MESURES DE CONCENTRATIONS EN SO2 PAR BARBOTAGE ET ANALYSE PAR CHROMATOGRAPHIE IONIQUE SELON NF EN 14791 OU ISO 11632
 $I_{CR}(C) = 0,089 C + 6$ en mg/m^3

Concentration mg/m^3	5	10	30	> 50
Intervalle de confiance en % de la concentration	120	69	29	21

MESURES DE CONCENTRATIONS EN O2 PAR ANALYSEURS PARAMAGNÉTIQUES SELON NF EN 14789
 $I_{CR}(C) = 0,029 C + 0,07$

Concentration en %	8 à 20	5 à 8	1 à 5
Intervalle de confiance en % de la concentration	3,8 à 3,2	4,3 à 3,8	10 à 4,3

MESURES DE CONCENTRATIONS EN SO2 PAR ANALYSEURS À ABSORPTION IR ET UV (Doc Essais interlaboratoires - Ineris Man-IPo 16CP09 -98/107.doc)

Concentration en mg/m^3	70	110	220	< 300
Intervalle de confiance en % de la concentration	46	33	16	13

MESURES DE CONCENTRATIONS EN MÉTAUX LOURDS SELON NF EN 14385

Composé	Concentrations en $\mu g/m^3 \cdot h$	Ic en %	Composé	Concentrations en $\mu g/m^3 \cdot h$	I _{CR} en %
As	0.5-10	294	Ni	0.5-10	393
Cd	2-10	147	Pb	100-550	97
Co	0-5	253	Sb	1-25	122
Cr	1-100	447	Tl	0.05-60	385
Cu	10-100	106	V	0.01-7	270
Mn	1-20	155			

MESURES DE LA TENEUR EN VAPEUR D'EAU SELON NF EN 14790 (essais interlaboratoires 2005 et 2007)

Teneur en % volumique	10-11	11-15
Intervalle de confiance en % de la teneur	17	15

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée

ANNEXE 7

Facteurs d'émission en polluants (résultats exprimés en μg , mg ou g/GJ d'énergie entrante)

Facteurs d'émissions des polluants mesurés lors des essais sur banc

Type de chaudière	Allure	COVT	Somme COV par canister	PM totales	PM 1	PM 2,5	PM 10	Somme 16 HAP	Somme 8 HAP	Somme 4 HAP	PCDD/PCDF	NO _x	CO
		mg/GJ	mg/GJ	mg/GJ				µg/GJ			pg I.TEQ/GJ	g/GJ	g/GJ
Gaz standard murale ancienne	nominale	< 64	16	16,3	9,3	12,9	14,6	98	17	< 1	-	37,4	13,2
	dégradée	354	139	2,0	< 0,2	< 0,2	< 0,2	329	25	< 1	-	38,8	12,5
	réduite	793	173	60	49	52	58	142	10	< 1	-	5,4	23,2
Gaz condensation murale récente	nominale	< 64	35	14,8	9,8	12,4	14,8	54	8	< 1	-	14,4	15,8
	dégradée	3283	423	1,4	< 0,2	< 0,2	1,4	92	6	< 1	-	13,4	13,1
	réduite	< 64	7	32	< 0,2	9,1	18,4	43	5	< 1	-	13,4	3,6
Gaz BT murale étanche récente	nominale	2653	545	1,7	< 0,2	1,7	1,7	52	6	< 1	-	19,4	10,4
	dégradée	3520	665	59	< 0,2	16,8	39,1	113	10	< 1	-	16,1	11,9
	réduite	2339	-	13,9	7,2	9,6	12,0	81	6	< 1	-	4,3	17,7
Gaz BT sol ancienne	nominale	< 64	81	2,2	0,5	1,7	2,2	116	10	< 1	-	16,0	2,0
	dégradée	1363	443	26	20	23	26	48	6	< 1	-	13,9	2,1
Fioul BT sol ancienne	nominale	< 64	7	75	60	65	70	3360	23	< 1	273	44,9	3,3
	dégradée	98	176	65	45	54	59	2957	< 3	< 1	217	42,8	2,9
Fioul BT sol récente	nominale	630	414	979	839	912	950	14834	137	< 1	435	36,8	13,4
	dégradée	749	1432	330	285	310	322	25370	178	< 1	276	33,5	13,2
Fioul BT sol ancienne	nominale	1612	110	380	307	341	365	31624	6216	269	544	33,7	16,9
	dégradée	1026	166	282	237	262	276	10739	1789	39	491	33,3	12,0

Facteurs d'émissions des COV mesurés lors des essais sur banc (essais effectués sur des chaudières gaz)

Chaudière gaz	standard murale ancienne			cond. murale étanche récente			BT murale étanche réc.		BT sol ancienne	
	nominale	dégradée	réduite	nominale	dégradée	réduite	nominale	dégradée	nominale	dégradée
Unité	µg/GJ									
éthane	2143	82062	119935	732	191485	<26,5	286589	338248	30612	293754
propane	836	28112	15351	1672	129216	104,5	127715	169843	12276	69535
n-butane	627	6114	2603	523	27124	52,2	30610	39371	3056	15693
n-pentane	523	1881	1017	340	6010	<78,4	8384	10764	1097	4648
iso-butane	340	6532	3022	496	34048	156,7	38419	47627	3813	21490
1,3-butadiène	<13,6	<15,2	90	52	78	<26,5	131	105	<21,4	104
benzène	314	3318	778	575	862	182,9	4910	3762	1619	1071
toluène	2091	2299	2394	18053	2482	3839,9	3892	1959	19276	2402
éthylbenzène	366	340	509	209	261	<132	261	340	209	653
m+p-xylène	1411	1176	1795	1228	1202	313,5	705	1176	888	3368
o-xylène	418	392	628	287	340	<132	209	340	313	1149
1,3,5-triméthylbenzène	287	261	419	1489	340	<157	287	209	287	1410
1,2,4-triméthylbenzène	653	810	1347	705	1150	261,2	731	810	888	3342
1,2,3-triméthylbenzène	575	653	898	3004	993	731,4	601	679	966	2611
Somme	10584	133948	150787	29365	395591	5642	503443	615232	75301	421230
Somme des COV dosés	15538	139051	173466	34747	423107	6944	545153	665498	80551	442824

La somme des COV dosés représente la somme de l'ensemble des COV identifiés et dosés (certains de ces composés ne sont pas mentionnés dans la liste ci-dessus).

Facteurs d'émissions des COV mesurés lors des essais sur banc (essais effectués sur des chaudières fioul)

Chaudière fioul	BT sol ancienne		BT sol récente		BT sol ancienne	
	nominale	dégradée	nominale	dégradée	nominale	dégradée
Unité	µg/GJ					
éthane	<26	2349	68318	4567	19376	713
propane	<26	686	<26	845	660	792
propène ou propylène	422	818	81016	95904	14677	18294
iso-butane	<26	475	<26	211	185	290
n-butane	79	871	<26	502	660	898
1-butène	475	1505	27533	30463	8315	6309
iso-pentane	211	2560	13463	14941	1373	1663
n-pentane	<26	1082	79	898	502	528
1,3-butadiène	<26	<53	977	766	317	<26
benzène	1874	1505	112218	170690	22676	19799
iso-octane ou 2.2.4-triméthylpentane	<370	765	3273	2244	1531	1399
n-heptane	<396	1584	<132	8474	1162	898
toluène	2983	4698	34608	65467	7946	10612
n-octane	<370	3986	1214	23310	9213	1980
éthylbenzène	<396	3854	6098	24577	<396	4197
m+p-xylène	<1214	13752	10533	122302	3960	4752
o-xylène	<370	5147	5808	41999	2534	2930
n-nonane	<371	15600	1742	94188	<396	6441
1,3,5-triméthylbenzène	<528	17342	3115	83629	<1584	3485
1,2,4-triméthylbenzène	<581	37139	8738	334649	<1769	47965
1,2,3-triméthylbenzène	<449	26871	3564	148542	8368	22438
n-décane	<766	28745	5940	131885	<1769	5702
Somme	6045	171334	388237	1401053	103454	162084
Somme des COV dosés	6705	175715	413764	1431886	110095	166150

La somme des COV dosés représente la somme de l'ensemble des COV identifiés et dosés (certains de ces composés ne sont pas mentionnés dans la liste ci-dessus).

