



(ID Modèle = 454913)

Ineris-170785-00117B

15/03/2019

Émissions atmosphériques de dioxines et de furanes bromés lors de feux accidentels de déchets contenant des substances bromées

Essais en plateforme incendie



PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des risques chroniques

Rédaction : Sabine GUERIN et Serge COLLET

Vérification : Nathalie VELLY et Isaline FRABOULET

Approbation : Martine RAMEL - le 15/03/2019

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Jean-Pierre BERTRAND, Adrien DERMIGNY, Pascal DUBOIS, Yannick DUPUIS, Vincent FUVEL, Denis Van ELSUVE, Fabien FOUILLEN, Karen PERRONNET, Benjamin TRUCHOT

Table des matières

1	Contexte et objectifs	8
2	Conditions de formation des dioxines bromés	9
3	Etude bibliographique des matériaux susceptibles d'émettre des dioxines et furanes bromés	10
3.1	Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques.....	10
3.1.1	Les gros appareils électro-ménagers en mélange et petits appareils en mélange	13
3.1.2	Circuits imprimés et câbles électriques	14
3.1.3	Câbles électriques	15
3.1.4	Plastiques des écrans de télévision	16
3.2	Autres déchets ménagers.....	16
3.2.1	Les bois traités et meubles en bois	16
3.2.2	Les équipements domestiques.....	17
3.3	Véhicules	18
3.3.1	Véhicules entiers	18
3.3.2	Banquettes de voiture.....	20
3.3.3	Les déchets de véhicules / Résidus de Broyage Automobile (RBA).....	20
3.4	Les combustibles solides de récupération	23
3.5	Matériaux retenus	24
4	Dispositif expérimental	28
5	Modalité des essais	29
5.1	Approvisionnement en matériaux pour essai	29
5.2	Conditions d'essais.....	29
5.3	Méthodologie	29
5.3.1	Paramètres et polluants mesurés en continu	29
5.3.2	Dioxines et furanes et PCB DL.....	29
5.4	Contrôle de l'absence de contamination de la chambre d'essais	31
6	Résultats.....	32
7	Commentaires	35
7.1	Ensemble des essais.....	35
7.2	Brûlage de véhicule	38
7.3	Câbles électriques	40
7.4	Valeurs cumulées (somme des facteurs d'émission en PCDD-DF, PCB DL et PBDD-DF) .	41
8	Conclusions	43
9	Références	44
10	Liste des annexes.....	47

Liste des figures

Figure 1 : performances des collectes de DEEE en 2016 (en kg/habitant) (source : ADEME, 2017c).	12
Figure 2 : répartition des tonnages de DEEE ménagers traités en 2016, par flux de collecte (ADEME, 2017c).	13
Figure 3 : concentrations initiales en PBDE des circuits imprimés bruts (A) et des boîtiers en plastiques (B) (Cai et al., 2018).	14
Figure 4 : composition en PBDE dans du PVC (l'axe horizontal représente la concentration en ng/g en échelle logarithmique) (Ni et al., 2016).	15
Figure 5: concentrations en chlore dans différents types de bois (Huron et al., 2017).	17
Figure 6 : nombre de feux de voiture et nombre total de feux et d'incendies ayant eu lieu en France (2014-2016).	18
Figure 7 : nombre de feux de voiture et nombre total de feux et d'incendies ayant eu lieu en Ile-de-France (2014-2016).	19
Figure 8 : matériaux composant une automobile.	21
Figure 9 : facteurs d'émission des différents congénères de PBDD-DF en pg WHO-TEQ/g lors de la combustion de RBA (Rey et al., 2016).	22
Figure 10: émissions de PCDD-DF dans des gaz de pyrolyse de RBA à différentes températures (Anzano et al., 2017).	23
Figure 11 : vue extérieure de la chambre de combustion 1000 m ³ .	28
Figure 12 : facteurs d'émission en CO et COVT des différents déchets.	35
Figure 13 : facteurs d'émission en HCl des différents déchets.	36
Figure 14 : facteurs d'émission en poussières des différents déchets.	36
Figure 15 : facteurs d'émission en dioxines et furanes chlorés des différents déchets.	37
Figure 16 : facteurs d'émission en dioxines et furanes bromés des différents déchets (avec deux échelles distinctes).	38
Figure 17 : facteurs d'émission en HCl de différents véhicules (véhicules A, B, C (gamme haute) et R (citadine) : projet Cortea Embruve, véhicule X (1998, gamme intermédiaire) : Lönnermark et al., 2006 ; véhicule (2002, gamme intermédiaire) : présente étude).	39
Figure 18 : facteurs d'émission en PCDD-DF des différents véhicules.	40
Figure 19 : profil des congénères de dioxines et furanes chlorés lors de brûlages de véhicules.	40
Figure 20 : facteurs d'émission en PCDD-DF des câbles électriques.	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : classement par catégories d'équipements électriques et électroniques (source : ADEME, 2017c).	11
Tableau 2 : concentration en brome dans différents types de DEEE (INERIS, 2017).	13
Tableau 3 : émissions en dioxines et furanes venant de la combustion de bois (Lavric et al., 2004).	16
Tableau 4 : semi quantification (en ng/g) des congénères dans des résidus de combustion d'équipements domestiques (Organtini et al., 2014).	18
Tableau 5 : nombre de feux de voiture et nombre de feux et incendies en France (2014-2016).	18
Tableau 6 : nombre de feux de voiture et nombre total de feux et d'incendies en Ile-de-France (2014-2016).	19
Tableau 7 : composition de RBA bruts (Mancini et al., 2014).	21
Tableau 8 : Tableau de synthèse des différents matériaux considérés.	25
Tableau 9 : composés dosés par le laboratoire d'analyses.	31
Tableau 10 : facteurs d'émission exprimés en masse de polluants émis par kg de déchet brûlé.	33
Tableau 11 : facteurs d'émission exprimés en masse de polluants émis par kg perdu.	34
Tableau 12 : facteurs d'émission cumulés et contribution de chaque famille chimique.	42

Résumé

Le troisième Plan régional Santé Environnement d'Ile-de-France a mis en évidence le besoin d'améliorer les connaissances sur les émissions potentielles de polluants émergents et en particulier les émissions relatives aux dioxines et furanes bromés en Ile-de-France.

Suite à l'utilisation accrue des retardateurs de flamme et autres produits bromés notamment dans les textiles et les plastiques, se pose la question des émissions de dioxines et furanes bromés lors de feux de déchets qu'ils soient accidentels ou sauvages.

Une campagne de mesurages des dioxines bromées dans l'air ambiant a été menée au cours de l'année 2017 en région francilienne. La présence de ces composés pourrait être liée à des combustions non maîtrisées (potentiels brûlages de déchets ou autres sources) (Airparif, 2018).

Dans ce contexte, des essais ont été menés par l'Ineris en chambre de combustion pour simuler des feux de déchets sur différentes typologies de matériaux susceptibles de contenir des composés bromés et mesurer les émissions de dioxines et furanes chlorés et bromés (PBDD-DF).

Une étude bibliographique a été menée pour préciser les matériaux les plus pertinents pour la réalisation de mesures au regard de l'accidentologie, de leur composition chimique (métaux pouvant servir de catalyseurs, composés bromés), de leur potentiel d'émission de dioxines lors de combustions et des quantités de déchets collectées. Cette étude a conduit à retenir 5 matériaux distincts pour la mise en œuvre d'essais de brûlages : des gros appareils électroménagers (GEM) broyés et entiers, des câbles électriques, un véhicule automobile, des banquettes de voitures et des combustibles solides de récupération (CSR).

Les essais ont été menés dans une chambre de 1000 m³ de l'Ineris, ventilée afin de simuler des brûlages à l'air libre ou incendies, avec de grands volumes de matériaux (plusieurs centaines de kg par essai).

Les résultats de cette étude expérimentale confirment l'émission de dioxines bromées lors du brûlage de déchets contenant des composés bromés. Des facteurs d'émission très variables sont obtenus selon les déchets étudiés, très probablement en fonction de leurs teneurs en chlore et en brome.

Les PBDD-DF peuvent contribuer de façon très majoritaire à l'équivalent toxique global (en retenant pour ces composés des facteurs équivalents toxiques identiques à ceux des congénères chlorés comme recommandé par les experts consultés par l'OMS) dans un bon nombre de cas (brûlages des CSR, GEM et véhicules notamment, matériaux connus pour contenir des retardateurs de flamme bromés). Lorsque les facteurs d'émission en PCDD-DF sont élevés, la contribution des PBDD-DF est moindre, voire négligeable dans le cas des brûlages des câbles électriques notamment (ceux-ci contenant a priori peu de brome).

Il ressort de cette étude la nécessité de considérer comme substances d'intérêt les dioxines et furanes bromés dans le cadre de la stratégie de prélèvements et d'analyses en situation post-accidentelle après un incendie, selon les matériaux brûlés. En outre, sur la base des mesures acquises lors de cette étude, des scénarios réalistes de feux de déchets pourraient être élaborés pour modéliser les émissions de dioxines et furanes bromés et ainsi évaluer l'exposition des populations riveraines à de potentielles combustions non maîtrisées ainsi que les impacts sanitaires associés.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Émissions atmosphériques de dioxines et de furanes bromés lors de feux accidentels de déchets contenant des substances bromées - Essais en plateforme incendie, Verneuil-en-Halatte : Ineris – 170785-00117B, 15/03/2019.

Mots-clés :

Dioxines bromées, dioxines chlorées, polychlorobiphényles, furanes, incendie, essais

Glossaire

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ASR	Automotive Shredder Residue
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels
DEEE	Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
EEE	Equipements Electriques et Electroniques
GEM (F/HF)	Gros appareils électro-ménagers (froids/hors froids)
I.TEF	Facteur international d'équivalent toxique
I.TEQ	Equivalent toxique international obtenu en multipliant la masse de chaque composé par son facteur d'équivalent toxique
m ₀ ³	Un mètre cube exprimé dans les conditions normales de température (273 K) et de pression (101,3 kPa)
PAM	Petits appareils en mélange
PCDD-DF	Polychloro dibenzodioxines et dibenzofuranes (dioxines et furanes chlorés)
PBDD-DF	Polybromo dibenzodioxines et furanes (dioxines et furanes bromés)
PBDE	Polybromodiphényléthers
PCB (PCB DL)	Polychlorobiphényles (polychlorobiphényles de type dioxines)
RBA	Résidus de Broyage Automobile
RFB	Retardateurs de flamme bromés
VHU	Véhicules Hors d'Usage

1 Contexte et objectifs

L'action 2.3 du Plan Régional Santé Environnement (PRSE 3) d'Ile-de-France¹ a notamment pour objectif d'améliorer les connaissances sur les émissions potentielles des dioxines et furanes bromés (PBDD-DF) pour renforcer à terme la lutte contre leurs potentiels impacts sur la santé humaine.

L'utilisation de retardateurs de flamme bromés notamment dans les plastiques et textiles a conduit la DRIEE Ile-de-France à s'interroger sur l'émission de dioxines et furanes bromés lors de la combustion accidentelle ou sauvage de déchets.

En effet, les rejets atmosphériques de substances polluantes lors d'incendies sont fréquents dans le secteur des déchets. L'incendie est ainsi impliqué dans près de 80% des cas d'accidents dans ce secteur, soit significativement plus que pour la moyenne des installations classées. Dans 45% des cas, l'incendie est couplé à un rejet de matières dangereuses ou polluantes (Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer, 2016).

Dans ce contexte, l'Ineris a proposé de mettre en œuvre des essais en chambre de combustion pour mesurer les émissions de dioxines et furanes bromés sur différentes typologies de matériaux contenant des composés bromés.

Ce projet a bénéficié d'un financement de la DRIEE Ile de France dans le cadre du PRSE 3 d'Ile-de-France et d'un cofinancement du ministère en charge de l'Environnement dans le cadre des missions d'appui aux pouvoirs publics de l'Ineris.

Après un bref rappel sur les connaissances relatives aux conditions de formation des dioxines et furanes bromés, le rapport présente successivement :

- L'étude bibliographique réalisée en amont des essais pour préciser les matériaux les plus pertinents à tester ;
- Les essais menés et leur interprétation.

¹ Identifier les sources de polluants émergents et mesurer la contamination des milieux

2 Conditions de formation des dioxines bromées²

Deux types de combustion peuvent être à l'origine des dioxines et furanes : les combustions contrôlées et les combustions incontrôlées. En combustion contrôlée, les principales sources émettrices sont les incinérateurs de déchets domestiques municipaux et industriels, ainsi que les installations de frittage et fonte de fer, d'aluminium et de cuivre, utilisant une part de métaux recyclés. Une étude visant à caractériser les émissions des dioxines bromées des incinérateurs de déchets non dangereux a été menée par l'Ineris en 2018 à la demande de la DGPR. La contribution des autres sources est méconnue. En combustion incontrôlée, les sources émettrices à considérer sont les feux accidentels domestiques ou industriels. Les secteurs industriels a priori concernés sont notamment ceux du recyclage de matériaux contenant des composés halogénés.

Une cartographie des flux halogénés (hors chlore) entrant dans les incinérateurs indique que la source principale de brome dans les déchets est liée aux retardateurs de flamme bromés (RFB) au vu de leurs applications nombreuses et variées : équipements électriques et électroniques, bâtiments et construction, transport et textile (RECORD, 2016). Le brome peut également être utilisé en applications industrielles sous forme de bromure d'hydrogène ou en intermédiaire de fabrication des produits agrochimiques et pharmaceutiques (INERIS, 2017a).

Il existe trois voies de formation des PBDD-DF à partir de RFB, toutes liées à un stress thermique (entre 50 et 250°C d'après Ortuño, Lundstedt, & Lundin, 2015) ou à une combustion :

- La **formation à partir de précurseurs** commence avec des molécules dont la structure est similaire à celle des molécules finales. Certains RFB sont directement transformés en PBDD-DF, alors que d'autres le sont par l'intermédiaire de mécanismes plus complexes ;
- La **formation selon la synthèse « de novo »** est la formation de PBDD-DF à partir du carbone organique résiduel et de composés bromés de masses moléculaires élevées provenant de combustions incomplètes, présents dans les cendres d'incinération. La formation selon la synthèse « de novo » se produit généralement dans la zone de refroidissement en postcombustion, zone dans laquelle les composés aromatiques bromés ont été en grande partie détruits. Elle se produit également dans le cas de combustions ou de feux incontrôlés (Ortuno, N., Conesa, J. A., Molto, J., & Font, 2014) ;
- La **combustion incomplète des PBDD-DF** contenus dans les RFB sous forme d'impuretés.

La formation de PBDD-DF à partir de précurseurs est grandement influencée par la présence de métaux catalyseurs tels que l'étain, le fer, le cuivre et le zinc. Dans le cas des installations de frittage, la formation des PBDD-DF augmente avec l'accroissement de la quantité de brome (sous forme de KBr), ce qui signifie que dans ces conditions, la formation des PBDD-DF a lieu par l'intermédiaire de la synthèse « de novo » et est similaire à celle des PCDD-DF (Drage, Aries, & Harrad, 2014). La formation à partir des précurseurs semble être la voie de formation privilégiée des PBDD-F lors de feux accidentels (Zhang, Buekens, & Li, 2016).

Des mesures de dioxines bromées en air ambiant ont été menées fin 2017 en Ile-de-France à proximité de sources diffuses (zones possibles de brûlages à l'air libre de déchets verts, domestiques ou de câbles) (Airparif, 2018). La présence de ces composés au droit d'un site proche de potentiels brûlages de déchets verts est interprétée comme étant liée à des combustions non maîtrisées ou à d'autres sources non identifiées.

² Les éléments présentés ci-après sont issus en partie de la synthèse bibliographique sur les dioxines et furanes bromés (INERIS, 2017a).

3 Etude bibliographique des matériaux susceptibles d'émettre des dioxines et furanes bromés

Le retour d'expérience de l'Ineris sur les facteurs d'émission en dioxines chlorées (INERIS, 2011 et projet Cortea Embruve, 2013) issus de brûlages de divers matériaux et les données de la littérature ont permis d'identifier les câbles et les matériels électriques, les plastiques et les véhicules comme des matériaux susceptibles d'émettre des dioxines et furanes lors de leur combustion.

Des échanges avec la DRIEE Ile-de-France sur les objets susceptibles de brûler lors de feux de déchets accidentels ou sauvages ont permis de conforter le choix des matériaux à étudier.

Ainsi, il a été indiqué que les câbles électriques pouvaient faire l'objet de brûlage pour récupération du cuivre. Par ailleurs, d'une manière générale, les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) constituaient des matériaux pertinents pour des essais en raison de l'éventualité d'incendies sur des sites de stockage de DEEE, ou d'entrepôts logistiques de matériaux neufs. De même, les véhicules pouvaient faire l'objet d'incendies occasionnels soit par vandalisme soit par manque de surveillance, en particulier au droit d'entreprises récupérant des véhicules pour les désosser.

Il est ressorti de ces échanges, une première sélection de matériaux pertinents pour la mise en œuvre d'essais : les câbles et les matériels électriques, les plastiques et les véhicules entiers. Des éléments de véhicules (tels que les pneus et les plastiques) sont apparus également comme des matériaux pertinents dont la combustion séparée pourrait apporter des éléments sur la part attribuable aux émissions des véhicules entiers.

Une recherche bibliographique a ensuite été entreprise pour :

- Confirmer la pertinence des matériaux préalablement identifiés pour la mise en œuvre d'essais en chambre de combustion ;
- Et identifier d'éventuels autres matériaux pertinents.

La recherche bibliographique sur les matériaux a ciblé notamment :

- Les données en termes d'accidentologie pour les feux lorsqu'elles sont disponibles ;
- La composition des matériaux en métaux (potentiels catalyseurs lors de la formation de PBDD-DF), en brome, en composés bromés dont les RFB ;
- Leur potentiel d'émission de dioxines (y compris chlorées) lors de combustions ;
- La quantité de déchets collectés en France pour ces différents matériaux.

3.1 Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques

Les déchets collectés de type câbles et matériels électriques relèvent des déchets d'équipements électriques et électroniques. Aussi, l'étude bibliographique a ciblé plus largement cette gamme de déchets potentiellement traités par les retardateurs de flamme bromés pour l'identification des matériaux pertinents à tester.

Le classement par catégories d'équipements électriques et électroniques (EEE) a évolué au cours de l'année 2018 au moment de la réalisation de l'étude bibliographique. Cette évolution fait suite à la transposition en droit français de la directive DEEE II (directive 2012/19/UE) qui prévoyait une modification de son champ d'application, intervenue le 15 août 2018. Ce classement est présenté en tableau suivant. Dans la suite du rapport, les EEE sont cités suivant l'ancien classement.

*Tableau 1 : classement par catégories d'équipements électriques et électroniques
(source : ADEME, 2017c)*

LES 11 CATEGORIES D'EQUIPEMENTS VALABLES A PARTIR DU 1ER JANVIER 2015 ET JUSQU'AU 14 AOUT 2018		LES 7 CATEGORIES D'EQUIPEMENTS VALABLES A PARTIR DU 15 AOUT 2018	
1 1A 1B	Gros appareils ménagers Équipements d'échange thermique Autres gros appareils ménagers	1	Équipement d'échange thermique
2	Petits appareils ménagers	2	Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm²
3 3A 3B	Équipements informatiques et de télécommunications Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ² , Autres équipements informatiques et de télécommunications	3	Lampes
4 4A 4B	Matériel grand public Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ² Autres matériels grand public	4	Gros équipements
5	Matériel d'éclairage	5	Petits équipements
6	Outils électriques et électroniques	6	Petits équipements informatiques et de télécommunications
7	Jouets, équipements de loisirs et de sport	7	Panneaux photovoltaïques
8		Dispositifs médicaux	
9		Instruments de surveillance et de contrôle	
10		Distributeurs automatiques	
11		Panneaux photovoltaïques	

Selon le rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques de l'ADEME3, le taux de collecte global⁴ des DEEE en France en 2016 atteint 48,8%. La carte ci-dessous reprend les quantités collectées (en kg/habitant) par département (cf. *Figure 1*). L'Ile-de-France est l'une des régions les moins performantes en termes de collecte de DEEE par habitant avec une moyenne collectée par habitant inférieure à l'objectif de 4 kg fixé par la Directive DEEE (ADEME, 2017c).

³ Depuis la réalisation de l'étude bibliographique dans le cadre la présente étude, le rapport a été actualisé avec les données 2017 et publié en 2018. Les informations contenues dans ce dernier rapport n'ont pas d'impact sur la suite des travaux (choix des matériaux à tester).

⁴ Quantité de DEEE collectée sur la moyenne des quantités de DEEE mis sur le marché les 3 années précédentes

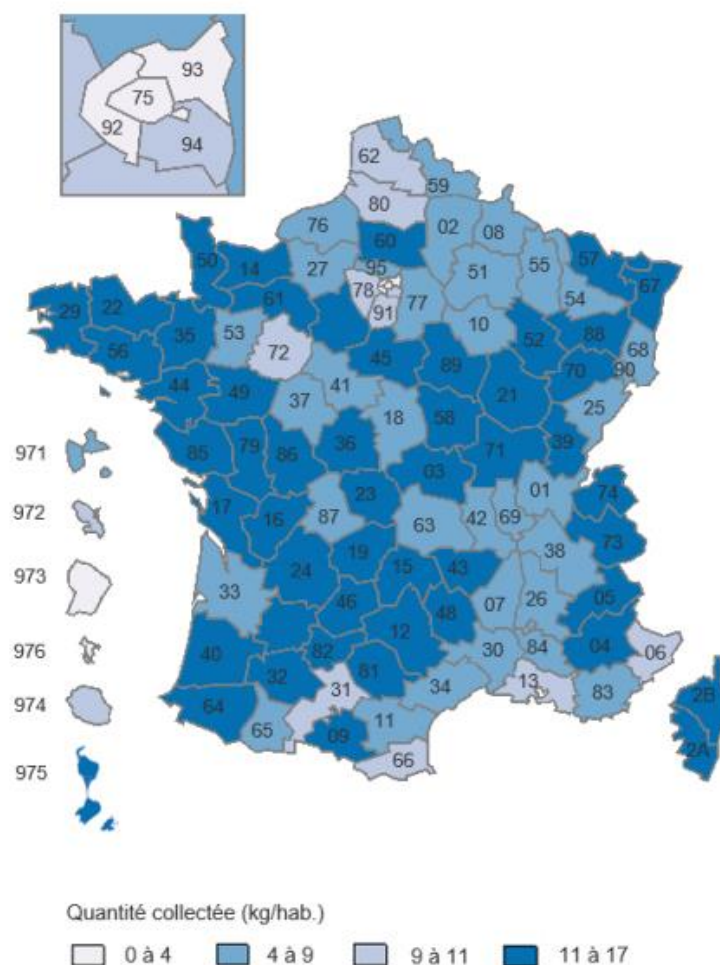


Figure 1 : performances des collectes de DEEE en 2016 (en kg/habitant) (source : ADEME, 2017c).

Les DEEE sont composés d'une famille très large de déchets. Un grand nombre d'entre eux contiennent du brome avec des teneurs dépassant 2000 mg/kg (Hennebert & Filella, 2018).

Une autre étude a montré que dans les déchets électroniques, la teneur médiane en brome est de 607 mg/kg. Des teneurs supérieures à 100 000 mg/kg ont été mises en évidence pour des boîtiers en plastique de différents déchets (Turner & Filella, 2017). Les écarts de valeurs trouvés parmi les DEEE peuvent s'expliquer par la nature variable de cette catégorie de déchets.

L'ADEME estime que les matières plastiques contenant des RFB représentent 22,3% des DEEE. Environ la moitié des DEEE est constituée de métaux ferreux qui peuvent agir comme catalyseur lors de la formation de PBDD-DF (ADEME, 2017c).

Une étude menée par l'Ineris met en évidence des concentrations significatives en brome dans différentes catégories de DEEE (INERIS, 2017). Le tableau 1 ci-dessous présente les concentrations en brome mesurées pour 7 catégories de DEEE.

Tableau 2 : concentration en brome dans différents types de DEEE (INERIS, 2017)⁵.

Catégorie d'équipement	Equipements (nombre)	Parties (nombre)	Parties avec Br > 100 mg/kg (nombre)	Br dans toutes les parties (mg/kg)	Br dans les parties avec Br > 100 mg/kg (mg/kg)
Outils	4	88	10	5321	46829
GEM	26	1232	89	3565	49348
Eclairage	39	425	44	3429	33125
PAM	14	310	36	2337	20988
IT	173	1253	91	1294	17815
Jouets	43	691	69	1258	12595
Audio-vidéo	48	219	24	895	8171
Total	347	4218	363	2307	26804

3.1.1 Les gros appareils électro-ménagers en mélange et petits appareils en mélange

Les Gros appareils Electro-ménagers en Mélange (GEM, Froid (F) et Hors Froid (HF) confondus) et les Petits Appareils en Mélange (PAM) représentent respectivement 56% et 27% des tonnages de DEEE ménagers collectés en 2016 (cf. figure 2), ce qui correspond à 115 093 tonnes et 303 406 tonnes d'équipements traités soit 418 499 tonnes au total. Les PAM représentent quant à eux 40 337 tonnes d'équipements traités en 2016 (ADEME, 2017c).

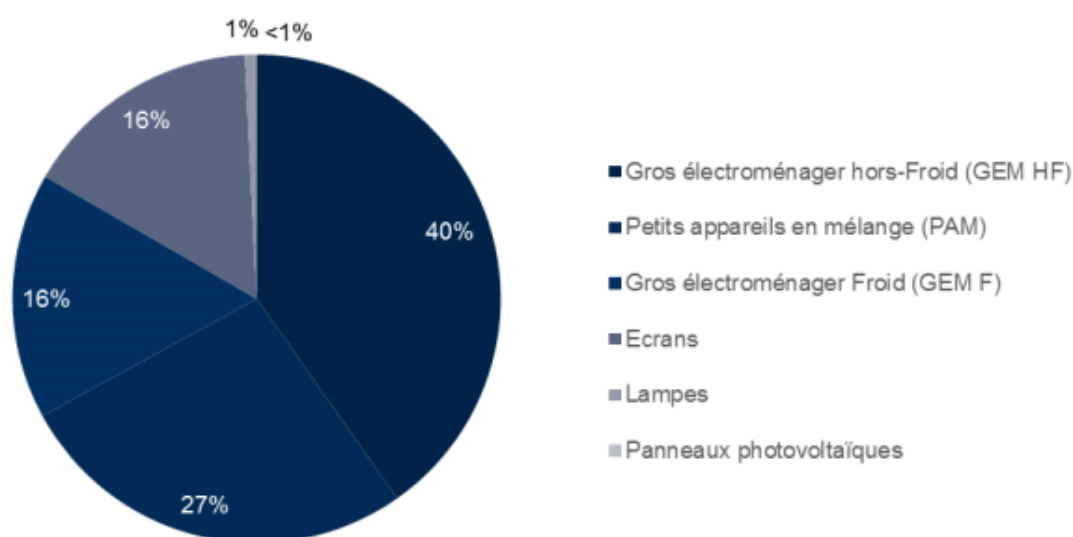


Figure 2 : répartition des tonnages de DEEE ménagers traités en 2016, par flux de collecte (ADEME, 2017c).

Plusieurs rapports et études récentes (cf. *Tableau 2*) indiquent que les GEM et les PAM sont concernés par la présence de brome (INERIS, 2017, 2018).

Les GEM froid sont composés à 60% de métaux, 20% de plastiques, 13% de polyuréthanes et 7% d'autres déchets (ADEME, 2017c).

⁵ Les cases bleues correspondent à des matériaux contenant en moyenne plus de 2000 mg/kg de Br. Les GEM correspondent à la catégorie « Large household appliances ».

3.1.2 Circuits imprimés et câbles électriques

Les circuits imprimés sont constitués de matières plastiques (contenant le plus souvent du trioxyde d'antimoine et des retardateurs de flamme bromés), de métaux ainsi que de fibres de verre pour le support en résine époxy (ADEME, 2017c).

Plusieurs études ont porté sur les émissions de PBDD-DF par les circuits imprimés lors de combustions à de faibles températures.

Parmi ces études, Gullett et al. (2007) ont caractérisé les émissions en dioxines et furanes chlorés et bromés lors de la combustion incontrôlée de circuits imprimés et de câbles électriques. Lors de cette étude, ces deux DEEE avaient des teneurs en brome et chlore très différentes : les circuits imprimés contenaient une plus grande proportion de brome (17 mg/g vs teneur inférieure au seuil de détection pour les câbles électriques) tandis que les câbles électriques présentaient une plus grande proportion de chlore (88,4 vs 1,9 mg/g pour les circuits imprimés). Gullett et al. (2007) soulignent les très forts facteurs d'émission en PCDD-DF lors de brûlages à l'air libre de câbles électriques (11,9 $\mu\text{g I.TEQ/kg}$ brûlé). Les facteurs d'émission en PCDD-DF déterminés lors de brûlages de circuits imprimés sont nettement plus faibles, de l'ordre de 0,092 $\mu\text{g I.TEQ/kg}$ brûlé. A l'inverse, les quantités de dioxines et furanes bromés émises sont bien supérieures lors des brûlages des circuits imprimés du fait des fortes teneurs en Br de ces matériaux : les congénères bromés sont 50 à 500 fois plus abondants que leurs homologues chlorés dans le cas de ces brûlages, les furanes bromés se forment alors préférentiellement. Quant aux câbles électriques, les faibles teneurs en PBDD-DF mesurées sont probablement en lien avec la très faible teneur en Br présente dans ce matériau. Les résultats en PBDD-DF de cette étude ne peuvent être exprimés en I.TEQ car les analyses n'ont pas été effectuées par congénère mais seulement par groupe de congénères ayant le même degré de bromation.

La teneur en brome des circuits imprimés est comprise entre 10 mg/g et 100 mg/g selon Turner & Filella, 2017.

Une étude approfondie de 2018 a permis de mesurer la concentration initiale en PBDE des circuits imprimés présents dans de nombreux DEEE (Cai, Yu, Liu, Tao, & Liu, 2018). Les circuits imprimés contiennent en moyenne 100 $\mu\text{g/g}$ de PBDE (cf. Figure 3 A, colonne « Tous circuits imprimés confondus »), avec des valeurs très variables selon la provenance, pouvant aller jusqu'à un rapport de 100 entre les DEEE ; les teneurs les plus faibles étant observées pour les imprimantes et les plus élevées pour les climatiseurs. Les boîtiers plastiques d'unité centrale, de téléviseur et d'écran d'ordinateur contiennent plus de PBDE que les circuits imprimés (cf. Figure 3 B).

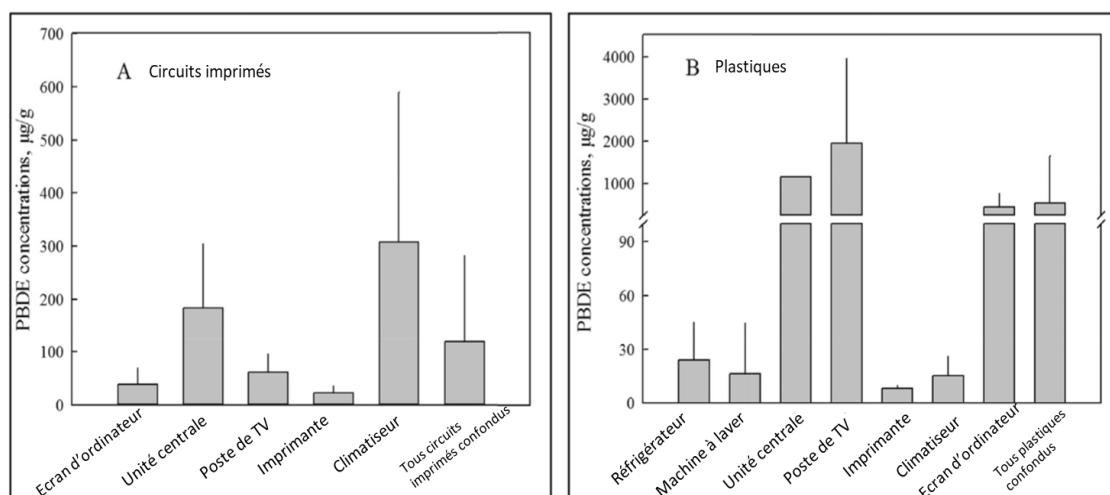


Figure 3 : concentrations initiales en PBDE des circuits imprimés bruts (A) et des boîtiers en plastiques (B) (Cai et al., 2018).

3.1.3 Câbles électriques

En France, en 2016, les câbles électriques représentaient 7% des DEEE ménagers collectés et 18% des DEEE professionnels (soit respectivement 8854 et 828 tonnes), sachant qu'une part importante de ces matériaux est récupérée via des filières illicites. Les câbles électriques font partie des équipements électriques et électroniques pouvant être utilisés à la fois par les ménages et par les professionnels : ils sont cependant considérés comme des DEEE ménagers (ADEME, 2017c).

Le PVC qui compose les gaines des câbles électriques est traité avec des RFB. Les déchets de PVC contiennent en moyenne 61,9 µg/g de PBDE (Ni, Lu, Mo, & Zeng, 2016). La Figure 4 illustre les teneurs en composés bromés dans du PVC issu de gaines de câbles électriques. Les PBDE les plus présents sont ceux contenant un nombre élevé d'atomes de Brome : notamment les congénères n°209, 206 et 196 ainsi que les 3 congénères du HBCD (hexabromocyclododécane).

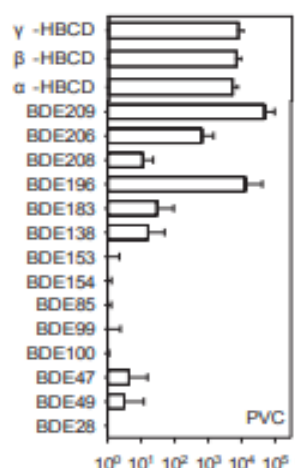


Figure 4 : composition en PBDE dans du PVC (l'axe horizontal représente la concentration en ng/g en échelle logarithmique) (Ni et al., 2016).

Les câbles électriques contiennent de nombreux métaux (et en particulier du cuivre) pouvant servir de catalyseurs lors de la synthèse de PBDD-DF à partir de précurseurs que sont les PBDE.

D'après le CITEPA⁶, la combustion incontrôlée de câbles électriques représente 35% des émissions nationales en PCDD-DF en France métropolitaine pour l'année 2015. Le brûlage de câbles produit de fortes émissions de dioxines chlorées notamment à cause de la présence de produits chlorés dans les gaines protectrices. Cependant, le recensement de ce type d'incendie est compliqué et il est également difficile d'estimer un facteur d'émission fiable associé aux feux de câbles (ADEME, 2017a).

Comme déjà indiqué dans le paragraphe précédent, Gullett et al., 2007 mentionnent de très forts facteurs d'émission en PCDD-DF lors de brûlages à l'air libre de câbles électriques (11,9 µg I.TEQ/kg brûlé) du fait des conditions de brûlage et des forts taux de chlore présents dans ces matériaux mais de faibles facteurs d'émission en PBDD-DF (valeur non exprimée en équivalent toxique).

⁶ <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/polluants-organiques-persistants/dioxines-et-furanes>

Afin d'établir des facteurs d'émission en PCDD-DF utilisables dans le cadre de l'inventaire national des émissions de polluants atmosphériques, l'Ineris a également mené à plusieurs reprises des essais dans des conditions différentes et avec des quantités différentes de matériaux brûlés :

- En 1999, plusieurs brûlages de câbles de caractéristiques différentes dans un calorimètre (2 kg de matériaux brûlés par essai) : facteur d'émission moyen de 1 µg I.TEQ/kg brûlé ;
- Et en 2013 dans le cadre du projet Cortea Embruve, un brûlage de 80 kg de câbles tout venant dans une chambre de 80 m³ : facteur d'émission déterminé de 1,67 µg I.TEQ/kg brûlé.

3.1.4 Plastiques des écrans de télévision

Parmi les DEEE, les écrans de télévisions à tubes cathodiques contiennent de fortes teneurs en RFB, notamment dans leurs coques plastiques (cf. *Figure 3*). Des teneurs en PBDE de l'ordre de 200 et 78 mg/kg ont été mesurées respectivement dans des plastiques et dans des DEEE (Morin, Andersson, Hale, & Arp, 2017).

La concentration exprimée en équivalent toxique pour un résidu de combustion provenant d'une télévision (155 µg TEQ /kg), s'avère bien supérieure à celles mesurées pour tous les autres résidus analysés dans l'article de Zelinski, Lorenz, & Bahadir (1993).

3.2 Autres déchets ménagers

3.2.1 Les bois traités et meubles en bois

Le mélange Cuivre/Chrome/Arsenic (CCA) a longtemps été utilisé pour les bois mis en œuvre en extérieur (clôture et aires de jeux). Cependant, depuis les années 1990, ce produit a été peu à peu interdit dans un nombre croissant de pays et pour un nombre croissant d'usages au profit de traitements à base de cuivre et de bore ou de molécules de synthèse (INERIS, 2013). En France, un décret du 17 novembre 2004 précise les conditions de mise sur le marché et d'emploi de l'arsenic et de ses composés et interdit l'utilisation de l'arsenic pour le traitement du bois, mais avec de nombreuses dérogations notamment pour un usage professionnel et industriel (JORF, 2004).

Le bois peut être également traité avec du pentachlorophénol (PCP), qui contient des microcontaminants dont les dioxines et furanes chlorés, ou hexachlorobenzène. Cependant, au vu de la nocivité de ce produit pour l'Homme et l'environnement, ses usages sont sévèrement réglementés (INERIS, 2013).

La quantité de dioxines et furanes chlorés émise lors de la combustion de différents types de bois a été investiguée et les données compilées par Lavric, Konnov, & De Ruyck, 2004. Lors de sa combustion, le bois traité émet presque 25 fois plus de dioxines et furanes chlorés que le bois non traité : le bois traité peut émettre jusqu'à 18 ng I-TEQ/Nm³ contre seulement 0,73 ng I-TEQ/Nm³ pour le bois naturel non traité. Des quantités plus importantes de PCDD-DF sont formées lors de la combustion de déchets de bois à ciel ouvert que lors de feux de forêts.

Tableau 3 : émissions en dioxines et furanes venant de la combustion de bois (Lavric et al., 2004).

Combustible	PCDD/F emissions, ng I-TEQ/N m ³ at 11% O ₂	
	Min	Max
Bois propre, naturel	0.0025	0.73
Déchets issus de bois traité	0.0022	18.025

Différents types de bois ont fait l'objet d'une étude de caractérisation pour le chlore (cf. *Figure 5*).

La plupart des déchets de bois testés par Huron, Oukala, Lardière, Giraud, & Dupont, 2017 possèdent des concentrations inférieures au seuil réglementaire en chlore concernant les déchets de bois utilisés comme combustible de 900 mg/kg pour le chlore⁷.

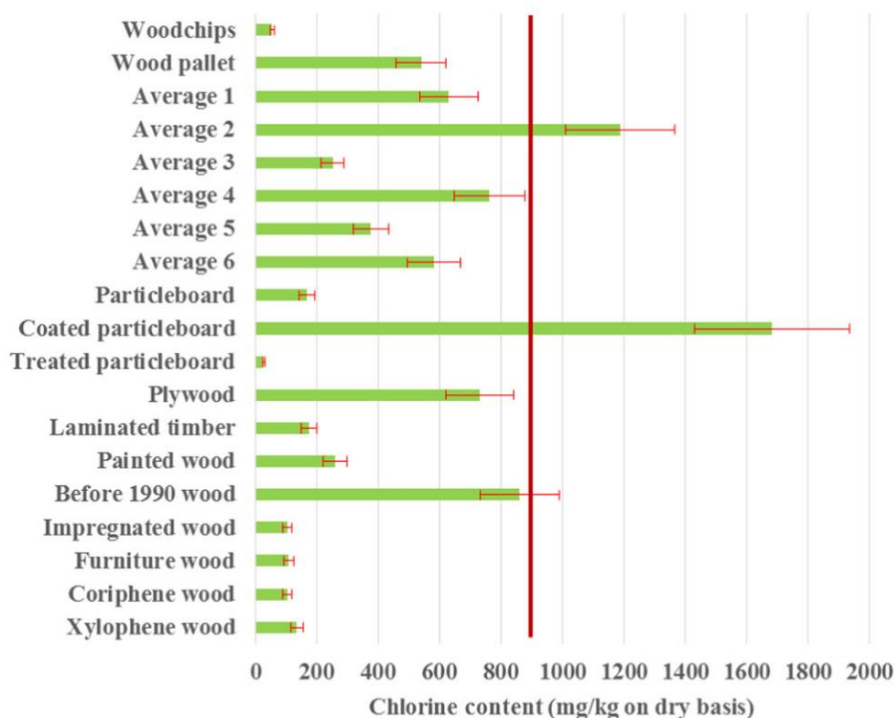


Figure 5: concentrations en chlore dans différents types de bois (Huron et al., 2017)⁸.

L'utilisation de composés polybromés ou perfluorés dans le bois utilisé pour l'ameublement n'a pas été confirmée par la filière professionnelle interrogée dans le cadre de l'étude relative à l'état des connaissances sur les usages, les sources d'exposition et la toxicité de plusieurs substances de la famille des polybromés (ANSES, 2017).

3.2.2 Les équipements domestiques

Les retardateurs de flamme bromés peuvent être présents dans les produits de consommation fabriqués par l'industrie des meubles (ANSES, 2017), notamment dans les tissus d'ameublement, les matelas et les tapis. Les RFB ont été utilisés dans la mousse souple de polyuréthane servant de capitonnage dans les meubles rembourrés.

La présence de PCDD-DF dans des résidus de feux accidentels ou simulés de différents objets (tapis, fauteuils, matelas, etc.) a été mise en évidence à plusieurs reprises avec des concentrations en PBDF très supérieures à celles en PBDD (Zelinski et al., 1993 et Organtini et al., 2014).

⁷ Selon l'arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les broyats d'emballages en bois pour un usage comme combustibles de type biomasse dans une installation de combustion NOR: DEVP1405250A concernant le chlore.

⁸ La ligne verticale rouge représentant la limite autorisée par la loi pour pouvoir utiliser le bois comme combustible.

Tableau 4 : semi quantification (en ng/g) des congénères dans des résidus de combustion d'équipements domestiques (Organtini et al., 2014).

Congénères	Tapis	Fauteuil (vinyle)	Matelas	Fauteuil (sofa)
Br	3.3	2.8	–	–
Br ₂	63	36	–	–
Br ₃	250	270	13	17
Br ₄	160	590	21	62
Br ₅	68	580	20	75
Br ₆	–	35	–	3.1

3.3 Véhicules

3.3.1 Véhicules entiers

De nombreux véhicules sont brûlés en France chaque année. L'analyse de la base de données data.gouv.fr (plateforme ouverte des données publiques françaises)⁹ a permis de recenser la quantité de voitures brûlées en France et en Ile-de-France et de considérer le nombre total de feux et d'incendies pour la période 2014 à 2016, ce qui a permis d'établir les tableaux et graphiques suivants (cf. *Tableau 5* et *Tableau 6* et *Figure 6* et *Figure 7*). Il est à noter que l'incendie se définit comme un feu violent et destructeur pour les activités humaines ou la nature.

Tableau 5 : nombre de feux de voiture et nombre de feux et incendies en France (2014-2016).

Année	Feux de voiture	Feux et incendies totaux
2016	52 701	298 823
2015	52 654	314 765
2014	53 362	284 635

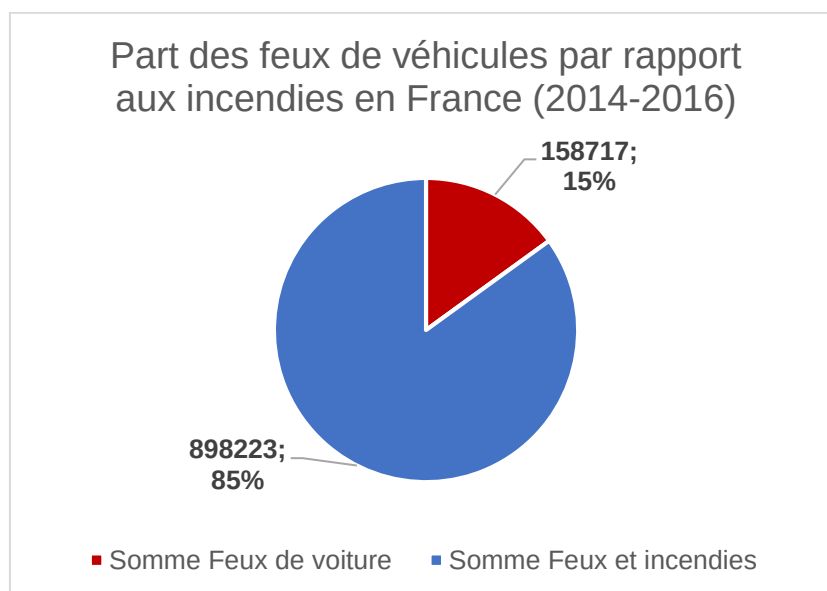


Figure 6 : nombre de feux de voiture et nombre total de feux et d'incendies ayant eu lieu en France (2014-2016).

⁹<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/interventions-realisees-par-les-services-d-incendie-et-de-secours/>

Tableau 6 : nombre de feux de voiture et nombre total de feux et d'incendies en Ile-de-France (2014-2016).

Année	Feux de voiture	Feux et incendies totaux
2016	10 551	35 721
2015	11 028	36 238
2014	10 302	33 079

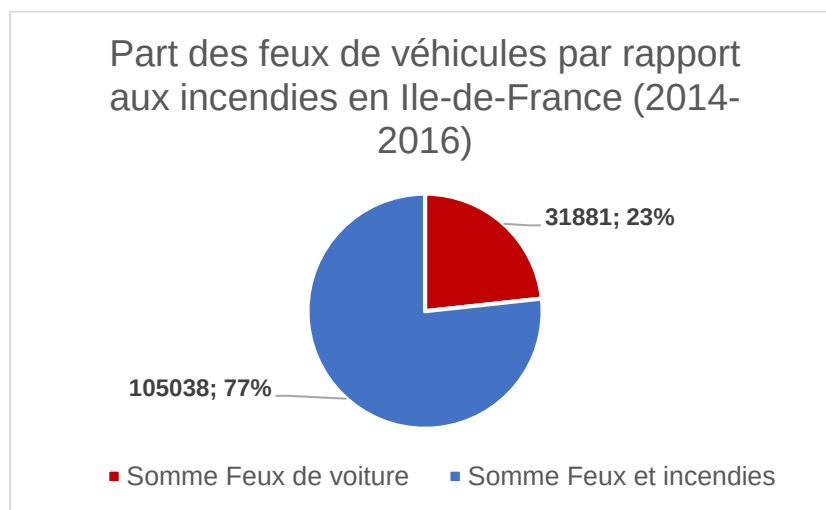


Figure 7 : nombre de feux de voiture et nombre total de feux et d'incendies ayant eu lieu en Ile-de-France (2014-2016).

Les feux de voitures constituent près d'un tiers environ des incendies en Ile de France. Ils constituent une part plus importante des incendies que sur l'ensemble du territoire national.

Plusieurs études ont été menées afin de déterminer les facteurs d'émission en dioxines et furanes chlorées lors de brûlages de véhicules.

Wichmann, Lorenz, & Bahadir, 1995 ont établi des facteurs d'émission en PCDD-DF lors de brûlages de deux véhicules dans un tunnel à partir d'une collecte des dépôts de ces polluants (méthodologie très différente de celle utilisée dans les autres études : phase gazeuse des polluants non prise en compte). Deux facteurs d'émission ont ainsi été obtenus : 32 μg I.TEQ/véhicule pour le véhicule le plus ancien datant de 1974 et 44 μg I.TEQ/véhicule pour le véhicule le plus récent datant de 1988.

Lönnermark & Blomqvist, 2006 rapportent des essais de brûlages menés sur un véhicule de 1998, de gamme intermédiaire, jugé représentatif par rapport aux matériaux constituant les véhicules de cette époque. Pour des raisons de sécurité, le véhicule a été brûlé sans batterie et sans carburant dans un calorimètre de grande dimension (3 x 4 m), en trois fois : d'abord le bloc moteur, ensuite le siège conducteur et enfin le reste du véhicule. Entre chaque brûlage, le feu a été éteint par aspersion d'eau et le véhicule séché avant d'effectuer le brûlage suivant. Un facteur d'émission en PCDD-DF de 71 μg I.TEQ/véhicule a ainsi été déterminé. En outre, ces tests mettent en évidence la présence de Zn, Pb et Cu en grande quantité dans les fumées et de Br dans les particules émises.

Dans le cadre du projet Cortea Embruve en 2013, d'autres facteurs d'émission en PCDD-DF ont été déterminés avec une procédure d'essais similaire à celle mise en œuvre dans le cadre de la présente étude mais dans une chambre d'essais de plus faibles dimensions en forme de tunnel. Ils étaient compris entre 5 et 28 μg I.TEQ/véhicule. Ces émissions provenaient essentiellement du brûlage des matériels électriques présents dans le véhicule. Cette étude a également mis en évidence de très fortes émissions de Zn et la quasi-absence d'émission de retardateurs de flamme bromés (PBDE 17 à 209, TBBPA et HBCD) lors du brûlage des véhicules entiers.

3.3.2 Banquettes de voiture

Les banquettes de voiture (coussins et textiles) sont des matériaux susceptibles d'être traités avec des RFB (ANSES, 2017).

Une étude sur le cycle de vie des voitures mentionne une concentration moyenne en PBDE de 46 098 mg/kg (25 158 – 65 842 mg/kg) pour les tissus de banquettes de véhicules (Choi et al., 2017).

Au Japon, une étude a montré que les concentrations en brome dans le tissu des sièges représentaient 60% du brome total dans le véhicule et variaient de 2 600 à 50 000 mg/kg. Les concentrations maximales en PBDE et en PBDD-DF mesurées dans les tissus des sièges étaient respectivement de 78 000 mg/kg et de 32 mg/kg (Kajiwara, Takigami, Kose, Suzuki, & Sakai, 2015).

Environ 1 million de véhicules hors d'usage (VHU) sont traités chaque année en France par environ 1 700 centres VHU et 60 broyeurs agréés alors que dans le même temps, 2,4 millions de véhicules neufs sont mis sur le marché national.¹⁰

3.3.2.1 Les pneus

En 2016, 478 878 tonnes de pneumatiques usagés ont été collectées (ADEME, 2017b).

Les pneus d'automobiles contiennent du zinc, du plomb et du cuivre ainsi que des traces de cadmium, qui agissent en tant que catalyseur lors de la formation de PBDD-DF à partir de précurseurs (Evans & Evans, 2006).

L'European Risk Assessment Report (EU-RAR) réalisé en 2002 rapporte l'utilisation minoritaire de déca-BDE dans la synthèse de styrène butadiène à l'origine de la fabrication de caoutchouc synthétique entrant dans la composition des pneumatiques.

Lors de la combustion de pneus, les fumées qui en sont issues contiennent également des PCDD-DF. Les facteurs d'émission déterminés sont cependant faibles : 1,1 à 10 ng TEQ/kg de pneus (Lönnermark & Blomqvist, 2005) et < 1 ng TEQ/kg de pneus (projet Cortea Embruve, 2013).

Aucune donnée sur les PBDD-DF contenus dans les fumées de combustion de pneus de véhicules n'a pu être obtenue.

3.3.3 Les déchets de véhicules / Résidus de Broyage Automobile (RBA)

En 2011, le gisement de RBA s'élevait à 286 800 tonnes en France. Les résidus de broyage automobile (RBA) sont obtenus à l'issue des opérations sur les véhicules hors d'usage (VHU) : dépollution, démontage de certaines pièces, broyage des carcasses et élimination des métaux contenus dans le broyat. Cette fraction représente 15 à 25% du poids initial du VHU. Cependant, selon certaines sources, le RBA est défini comme la fraction issue du broyage mais avant élimination des métaux (soit environ 75% du poids du VHU) (RECORD, 2014).

¹⁰Site <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/vehicules-hors-dusage> consulté le 15 mars 2019

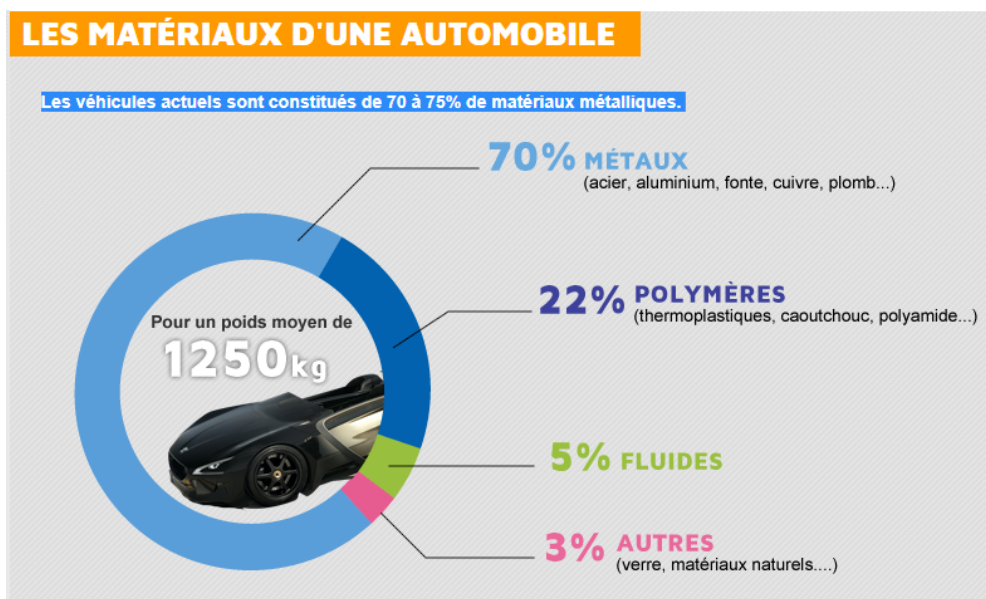


Figure 8 : matériaux composant une automobile¹¹.

D'après la Figure 7, 70% de la masse d'une automobile est constituée de métaux pouvant agir comme des catalyseurs lors de la synthèse des PBDD-DF et PCDD-DF. Les matériaux composant une automobile sont également composés de polymères à hauteur de 22%, qui sont souvent traités avec des RFB.

La composition des RBA légers et lourds varie très fortement d'une installation de broyage à l'autre, en fonction des flux et des techniques. Le RBA léger prétraité est considéré comme un déchet dangereux du fait de son hétérogénéité, de la variabilité de sa composition et de sa contamination fréquente par des liquides organiques, principalement PCB et HAP (RECORD, 2014).

Des concentrations en RFB mesurées dans des RBA révèlent des concentrations totales en PBDE allant de 3 à 63 mg/kg (Morin et al., 2017). Entre 3 et 7 ng I.TEQ/kg de PCDD-DF ont été mesurés dans différents échantillons de RBA.

Une revue de la littérature datant de 2013 a répertorié les concentrations retrouvées pour certains polluants (dont PCB et PCDD-DF) présents dans plusieurs échantillons de RBA bruts (cf. Tableau 8) (Mancini, Viotti, Luciano, & Fino, 2014). Les concentrations en PCB et en PCDD-DF sont comprises respectivement entre 0,08 et 44,5 mg/kg et entre 1,2 et 56,7 ng I.TEQ/kg.

Tableau 7 : composition de RBA bruts (Mancini et al., 2014).

Paramètres	Unités	ASR 2007	ASR 2008	Keller (2003)	APAT (2006)	Morselli et al. (2010)	Santini et al. (2011)
PCB	mg/kg s.s.	7.9 ± 1.7	2.69 ± 0.39	5–14	44.45 ± 34.06	5.3	0.08–0.109
PCDD/PCDF	ngTE/kg s.s.	3.02 ± 0.50	1.19 ± 0.04	14	56.75 ± 44.64		3–4

Rey, Conesa, Aracil, Garrido, & Ortuño, 2016 ont étudié la formation de PCDD-DF et PBDD-DF lors de la pyrolyse et de la combustion de RBA. Les résultats obtenus mettent en évidence :

- Pour les PCDD-DF :
 - La formation privilégiée de furanes (composés plus stables thermiquement) ;
 - La quasi-absence de formation de ces polluants par pyrolyse (en l'absence d'oxygène) ;

¹¹ Image disponible à <https://www.planeteautomobile.com/filiere-automobile/eco-conception-recyclage/materiaux-automobile/>

- La quasi-absence de formation de ces polluants lorsque des températures élevées de combustion sont atteintes (850°C) quel que soit l'excès d'air ;
- La formation en grande quantité de ces polluants lorsque la température de combustion est faible (600°C) ;
- Pour les PBDD-DF :
 - La quasi-absence de formation de ces polluants par pyrolyse (en l'absence d'oxygène) ;
 - La quasi-absence de formation de ces polluants lorsque des températures élevées de combustion sont atteintes (850°C) sauf en présence de forts excès d'air ;
 - La formation de ces polluants lorsque la température de combustion est faible (600°C) et la combustion pauvre en oxygène. Des facteurs d'émission de l'ordre de 1 à 2 µg WHO-TEQ/kg sont alors observés.

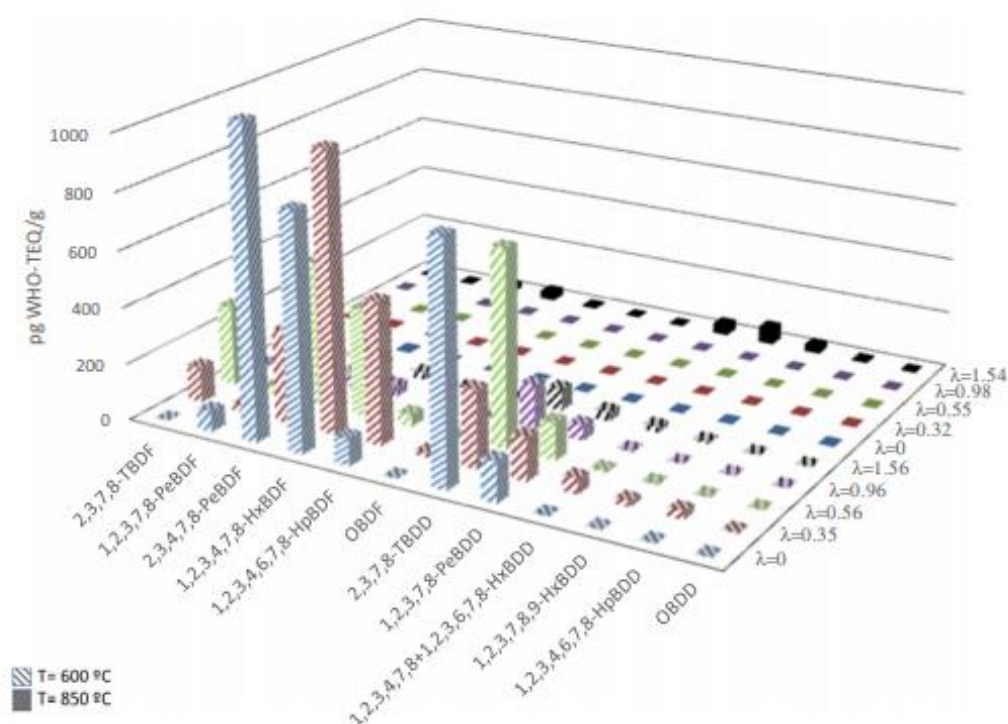


Figure 9 : facteurs d'émission des différents congénères de PBDD-DF en pg WHO-TEQ/g lors de la combustion de RBA (Rey et al., 2016) ¹².

Une autre étude menée par Anzano, Collina, Piccinelli, & Lasagni, 2017 relate les effets de la pyrolyse de RBA à différentes températures sur les émissions de PCDD-DF dans les gaz de pyrolyse. La Figure 10 met en évidence une augmentation graduelle de ces émissions jusqu'à une température de 700°C avant de décroître.

¹² λ est le facteur stœchiométrique d'oxygène. $\lambda=1$ représentant une combustion complète en proportion stœchiométrique

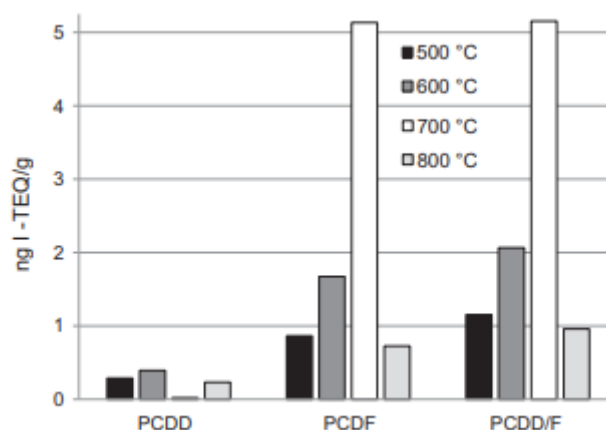


Figure 10 : émissions de PCDD-DF dans des gaz de pyrolyse de RBA à différentes températures (Anzano et al., 2017).

3.4 Les combustibles solides de récupération

Les CSR (Combustibles Solides de Récupération) sont des matériaux valorisés pour servir de combustibles qui regroupent tout type de déchets non dangereux solides. Produits à partir de gisements de déchets municipaux ou industriels, ils peuvent être composés d'un ou plusieurs éléments suivants (ADEME, 2015) :

- Pneus ;
- Plastiques ;
- RBA (Résidus de Broyage Automobile) ;
- Papiers/cartons ;
- Bois et déchets de bois (classe B) ;
- Papiers, cartons et boues de papeterie ;
- Boues de STEP (stations d'épuration) ;
- Textiles ;
- Déchets ménagers.

Les CSR les plus pertinents dans le cadre de cette étude sont ceux contenant des plastiques, en raison de la grande proportion de plastiques traités avec des RFB (Retardateurs de Flamme Bromés). Les matériaux des CSR étant souvent mélangés entre eux après le tri, un flux de CSR plastique n'est pas composé à 100% de plastique.

En 2015, l'ADEME a réalisé des analyses sur 17 échantillons de CSR provenant de différentes filières (résidus de broyage légers, déchets industriels banals, ordures ménagères, etc.). Les résidus de broyage légers (majoritairement composés de plastiques) sont les plus chargés en brome. Les trois échantillons de résidus de broyage légers analysés contenaient respectivement 359, 373 et 941 mg/kg de brome. Les résultats d'analyse montraient par ailleurs :

- Des teneurs en chlore allant de 0,5 à 3,3 % ;
- Des concentrations en brome très variables : inférieures à la limite de quantification (< 50 mg/kg) jusqu'à atteindre 950 mg/kg (RB légers) selon la filière de provenance des CSR ;
- La présence de métaux lourds dans les CSR et notamment dans les résidus de broyage automobile.

Lors d'essais de combustion réalisés sur deux échantillons (déchets industriels et encombrants), des PCDD-DF ont été quantifiées dans les fumées à des concentrations comprises entre 16 et 93 ng/m³ sec (ADEME, 2015). Il est à noter qu'il n'y a pas eu de mesures de PBDD-F lors de ces essais.

3.5 Matériaux retenus

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser de manière qualitative et quantitative l'ensemble des informations acquises sur les différents matériaux au regard de différents critères (*Tableau 8*) :

- Leur composition chimique (présence de métaux pouvant servir de catalyseurs, de composés bromés) ;
- Leur potentiel d'émission de dioxines lors de brûlages ;
- Des quantités de déchets collectées en France ;
- Et des données d'accidentologie relatives aux incendies pouvant affecter ces matériaux.

L'évaluation qualitative du potentiel d'émission est basée le plus souvent sur des mesures de concentrations dans les résidus de combustion et plus rarement sur des mesures dans les fumées.

A l'issue de l'étude bibliographique, six matériaux distincts ont été retenus pour la mise en œuvre d'essais de brûlages : des gros appareils électroménagers (GEM), des circuits imprimés, des câbles électriques, un véhicule automobile entier, des banquettes de voiture et des combustibles solides de récupération (CSR).

Ce choix confirme la première sélection qui avait été faite en amont de l'étude bibliographique pour les câbles, les matériels électriques et les véhicules automobiles. En termes d'éléments de véhicules à tester indépendamment du véhicule, les banquettes, connues pour être traitées par les RFB, sont apparues comme plus pertinentes que les pneus pour lesquels la littérature rapporte une utilisation minoritaire de déca-BDE pour la fabrication du caoutchouc synthétique.

Parmi les matériaux retenus, trois correspondent à des DEEE (les GEM, les circuits imprimés et les câbles électriques). Ceux-ci représentent une fraction importante des DEEE produits à l'échelle nationale.

Aucun essai n'a pu être réalisé par la suite avec des circuits imprimés, en raison de l'impossibilité de s'approvisionner en déchets de ce type, et cela malgré plusieurs sollicitations auprès de centres de recyclage. Ces matériaux étant particulièrement dangereux pour l'environnement, les organismes les recevant ont l'obligation de les détruire rapidement après les avoir reçus.

Les gisements de GEM pouvant être constitués d'équipements entiers (dans des entrepôts par exemple) ou broyés (plateforme de broyage et de valorisation), les deux modalités ont été testées.

De précédents essais de combustion ayant été menés sur des câbles électriques et un véhicule automobile pour la mesure des émissions de dioxines chlorées, les nouveaux essais réalisés sur ces matériaux au cours de la présente étude permettent de compléter les connaissances déjà acquises.

Dans le cadre de la présente étude, un test sur un véhicule complet a été réalisé. La composition d'un véhicule étant spécifique de la marque et du modèle, l'essai est mené selon une démarche exploratoire sans chercher à être représentatif de l'ensemble du parc automobile français.

Tableau 8 : Tableau de synthèse des différents matériaux considérés

Matériaux		Retenu	Métaux	Brome/ Chlore	PBDEs	PBDD-F	PCDD-DFs	Tonnages
DEEE	Gros appareils électro-ménagers (GEM)	Oui	Contient des métaux	Présence de brome	Contient des plastiques potentiellement traités aux RFB	-	Formation de PCDD-DFs lors de la combustion	400 000 tonnes (2016)
	Circuits imprimés	Oui (Non effectué, problème d'approvisionnement)	Contient des métaux	Présence de brome et de chlore	Contient des PBDE	Formation de PBDD-F lors de la combustion	Formation de PCDD-DFs lors de la combustion	13 000 tonnes (2016)
	Câbles électriques	Oui	Principalement du cuivre	Présence de chlore Pas de données trouvées sur les concentrations en brome	Contient des PBDE	-	Formation de PCDD-DFs lors de la combustion	10 000 tonnes (2016)
	Ecrans cathodiques (dont matières plastiques)	Non	Contient des métaux ferreux	Présence de brome (valeur maximale pour des boîtiers plastiques)	Contient des PBDE, notamment dans les plastiques des téléviseurs	Formation de PBDD-F lors de la combustion	Formation de PCDD-F lors de la combustion	Tubes cathodiques : 65 000 tonnes (2016) Matières plastiques contenant des RFB : 30 000 tonnes (2016)
Autres déchets ménagers	Bois et meubles traités	Non	Présence de métaux (cuivre et CCA dans les déchets plus anciens)	Pas de données trouvées sur les	Pas de données trouvées	Pas de données trouvées	Présence de composés chlorés (PCP) et de PCDD-DF	Environ 6 Mt

Matériaux		Retenu	Métaux	Brome/ Chlore	PBDEs	PBDD-F	PCDD-DFs	Tonnages
				concentrations en brome			dans certains bois traités Formation de PCDD-DF lors de la combustion	
	Tapis	Non	-	Contient du brome dans les résidus de combustion	Contient des quantités modérées de RFB	Formation de PBDD-F lors de la combustion	Formation de PCDD-F lors de la combustion	Manque de données sur les tonnages produits en France
Véhicules	Véhicules entiers	Oui	Contient des métaux	Contient du chrome et du brome dans les fumées de combustion	Présence de retardateur de flammes bromés dans les sièges de voitures	-	Formation de PCDD-F lors de la combustion	chaque année, 1 million de véhicules hors d'usage sont produits en France ¹³ .
	Banquettes de voiture	Oui	-	Contient du brome	Présence de retardateur de flammes bromés dans les sièges de voitures	Contient des PBDD-F	-	Quantité corrélée au nombre de véhicules hors d'usage estimé à 1 million par an
	Pneus	Non	Contient des métaux	-	Présence de déca-BDE dans le caoutchouc synthétique	Pas de données trouvées	Formation de PCDD-DFs lors de la combustion	480 000 tonnes (2016)

¹³ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/vehicules-hors-dusage>

Matériaux		Retenu	Métaux	Brome/ Chlore	PBDEs	PBDD-F	PCDD-DFs	Tonnages
	Déchets de véhicules/ Résidus de Broyage Automobile (RBA)	Non	Contient des métaux (si non recyclés)	-	Contient des RFB	Formation de PBDD-F lors de la combustion	Contient des PCBs et PCDD-DFs Formation de PCDD-DFs lors de la combustion	290 000 tonnes (2014)
Combustibles Solides de Récupération (CSR)		Oui	Contient des métaux	Selon les filières, peut contenir des RFB, du brome (notamment résidus de broyage léger) et du chlore (entre 0,5 et 3,3 %).		-	Formation de PCDD-DFs lors de la combustion	-

4 Dispositif expérimental

Les essais de brûlage ont été menés sur la plateforme incendie de l'Ineris habituellement employée à l'amélioration des connaissances dans le domaine des risques incendies. Dans le cas présent, une chambre de 1000 m³ a été utilisée car sa grande taille permettait d'effectuer des essais sur de grands volumes de matériaux tout en minimisant les effets de parois.

Cette chambre est équipée en son centre d'une plateforme de pesage (5 x 5 m) sur laquelle les matériaux à tester ont été placés.

Les fumées sont collectées par la partie supérieure de la chambre au moyen d'une gaine et d'un extracteur à débit variable permettant de ventiler suffisamment la chambre pour obtenir des conditions d'essais représentatives des conditions naturelles de brûlage à l'air libre. L'ensemble des effluents gazeux émis lors de chaque combustion est ainsi canalisé, ce qui permet de faciliter la caractérisation des émissions. Lors des essais, l'air de combustion est introduit par des lucarnes situées sur des côtés distincts de la chambre. Des dispositifs de mesurages compatibles avec les niveaux de concentrations attendues sont mis en place à 15 - 20 m de la source sur une longueur droite de la gaine d'extraction des fumées permettant d'obtenir un écoulement homogène. Cette chambre présente l'avantage de disposer d'une aéraulique connue (mesurages du débit d'air par sondes de type Pitot et mesurages de vitesses d'écoulement par sondes de type Mac Caffrey) et relativement bien maîtrisée (taux de dilution et temps de transport des polluants), ce qui facilite l'exploitation des résultats.



Figure 11 : vue extérieure de la chambre de combustion 1000 m³.

La chambre d'essai est par ailleurs équipée d'un dispositif de traitement des fumées performant comprenant un lavage des gaz, une injection d'adsorbants et une filtration (filtre à manches), situé en aval du point de prélèvement, ce qui permet de minimiser les rejets en polluants à l'atmosphère.

5 Modalité des essais

5.1 Approvisionnement en matériaux pour essai

Afin de réaliser des essais sur une durée suffisante (1 à 4 heures) nécessaire pour effectuer les prélèvements des polluants souhaités, des quantités importantes de matériaux ont été achetées et mises en œuvre lors des essais.

Les matériaux ont été approvisionnés auprès d'organismes de recyclage et de centres de gestion/traitement des déchets.

5.2 Conditions d'essais

Le poids des matériaux brûlés est suivi en continu à chaque essai. Les prélèvements de polluants ont été effectués durant l'ensemble des phases de combustion, de l'allumage jusqu'à l'extinction du feu (absence ou quasi-absence de fumées émises). Les principales conditions d'essais (durée de l'essai, perte de masse, débit d'extraction de la chambre) sont présentées dans les tableaux 9 et 10.

Les conditions d'essais détaillées sont décrites par essai dans des fiches en annexe 2.

5.3 Méthodologie

5.3.1 Paramètres et polluants mesurés en continu

Les paramètres et polluants suivants ont été caractérisés en continu :

- La température en tant qu'indicateur de l'avancement de la combustion ;
- Les teneurs en composés gazeux : CO, CO₂ par IR (spectroscopie infrarouge), O₂ par analyse paramagnétique, CH₄ et COVT (composés organiques volatils totaux) par FID (détecteur à ionisation de flamme), NO_x par chimiluminescence, en tant qu'indicateur de la qualité et de l'avancement de la combustion ;
- Les teneurs en formaldéhyde, HF, HCl, HCN, SO₂ à l'aide d'un analyseur FTIR (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier).

5.3.2 Dioxines et furanes et PCB DL

Compte tenu des méthodes présentées dans la littérature ainsi que de la grande similitude chimique entre les PBDD-DF et les PCDD-DF, les mesurages à l'émission ont été réalisés selon le mode opératoire préconisé par la norme française NF EN 1948 (Détermination de la concentration massique en PCDD-PCDF et PCB de type dioxine). Cette méthodologie est reconnue et employée à l'émission des incinérateurs de déchets notamment.

Les mesurages ont été effectués selon les normes suivantes :

- NF EN 1948-1 : prélèvement des PCDD-DF ;
- NF EN1948-2 : extraction et purification de PCDD-DF ;
- NF EN1948-3 : identification et quantification des PCDD-DF ;
- NF EN1948-4 : prélèvement et analyse des PCB de type dioxine ;
- GA X43-139 : guide d'application.

Les gaz prélevés de manière isocinétique passent à travers une cartouche de résine Amberlite XAD-2 adsorbant les polluants recherchés. Des marqueurs isotopiques (¹³C₁₂) sont ajoutés avant prélèvement pour identifier des anomalies lors du prélèvement (ils ne sont pas utilisés pour la quantification). Durant toute la durée du prélèvement, le volume de fumée prélevé et la concentration en O₂ sont mesurés et enregistrés. En fin de prélèvement et jusqu'à l'analyse, les échantillons sont conservés à l'abri de la lumière et au frais.

Le dispositif de mesurage permet de déterminer une concentration moyenne en polluants durant la période de prélèvement (1 à 4 heures environ selon les essais).

Pour la réalisation des analyses de PCDD-DF, PCB DL et PBDD-DF, l'Ineris a mandaté le laboratoire Micropolluants Technologie.

Compte tenu des similarités entre les PBDD-DF, les PCDD-DF et les PCB DL, les méthodes d'extraction et d'analyse sont très proches. Etant donné qu'il n'existe pas de norme associée à cette famille chimique, le laboratoire d'analyses (Micropolluants Technologie) a utilisé son propre protocole validé en interne.

Ce protocole fait appel aux techniques :

- D'extraction : extraction au Soxhlet des filtres et adsorbants avec un solvant organique avec ajout de marqueurs $^{13}\text{C}_{12}$ pour déterminer le rendement d'extraction et extraction liquide/liquide de la phase aqueuse avec un solvant organique ;
- De concentration : rassemblement des extraits et évaporation des solvants organiques ;
- De purification : sur plusieurs colonnes chromatographiques de nature différente afin d'éliminer les interférents.

Les analyses sont effectuées par chromatographie gazeuse qui permet d'identifier les isomères, couplée à la spectrométrie de masse haute résolution qui permet de différencier les congénères en fonction de leur degré de chloration. La quantification est effectuée à l'aide des marqueurs isotopiques injectés (méthode dite de dilution isotopique).

Seuls quatre congénères bromés analogues aux PCDD-DF, parmi les 17 recherchés, ne peuvent être quantifiés du fait de l'absence d'étalons isotopiques.

Par ailleurs, l'identification et la séparation des congénères ayant le même degré de bromation restent délicates.

Tableau 9 : composés dosés par le laboratoire d'analyses

Congénères dosés	I-TEF¹⁴	Micropolluants Technologie
2378 -TeBDD	1	x
12378-PeBDD	0,5	x
123478-HxBDD	0,1	x (somme des 2 congénères)
123678-HxBDD	0,1	
123789-HxBDD	0,1	x
1234678-HpBDD	0,01	x
OcBDD	0,001	x
2378 -TeBDF	0,1	x
12378-PeBDF	0,05	x
23478-PeBDF	0,5	x
123478-HxBDF	0,1	x
123678-HxBDF	0,1	
234678-HxBDF	0,1	
123789-HxBDF	0,1	
1234678-HpBDF	0,01	x
1234789-HpBDF	0,01	
OcBDF	0,001	x

Notons que les congénères bromés ayant les facteurs d'équivalents toxiques en PCDD-DF (I-TEF) les plus élevés sont dosés.

5.4 Contrôle de l'absence de contamination de la chambre d'essais

Les essais ont été menés dans un certain ordre afin de minimiser les contaminations croisées d'un essai à l'autre. L'ordre des essais a été défini en fonction des critères suivants :

- La puissance thermique dégagée par la combustion du matériau testé ;
- L'effet de dépôt/décrochage des particules éventuellement présentes sur les parois de la chambre et son conduit d'aspiration des fumées ;
- Les teneurs en PBDD-DF et PCDD-DF attendues.

Etant donné qu'il n'était pas possible de nettoyer la chambre entre chaque essai, trois blancs de site ont été effectués afin de vérifier l'absence de contamination d'un essai à l'autre :

- Le premier préalablement à l'ensemble des essais de façon à vérifier l'état initial de la chambre;
- Le second après le brûlage du véhicule : la forte puissance thermique dégagée lors de ce brûlage étant susceptible de décrocher des particules présentes sur les parois de la chambre ou du conduit ;
- Le dernier, après brûlage des GEM.

Les résultats obtenus sont présentés en annexe 1.

¹⁴ Facteur international d'équivalent toxique pour les congénères chlorés.

Ils mettent en évidence la très faible contamination d'un essai à l'autre. Seuls les essais qui présentent de très faibles teneurs en polluants sont susceptibles d'avoir été contaminés, ce qui pourrait être le cas de l'essai banquettes par l'essai CSR 2.

6 Résultats

Les facteurs d'émission établis, lors des brûlages des divers déchets, sont présentés dans les deux tableaux de synthèse ci-après. Les facteurs d'émission ont été exprimés de deux manières distinctes :

- En masse de polluants émis par kg de déchet brûlé (ou masse initiale) ;
- Et en masse de polluants émis par kg perdu lors du brûlage (afin de comparer les résultats obtenus entre eux).

Ces facteurs d'émission pourront être utilisés dans le cadre des inventaires régionaux et nationaux des émissions de polluants atmosphériques ou pour déterminer le flux de polluants émis lors d'incendies.

Pour les PCDD-DF, les résultats sont exprimés en équivalent toxique (I.TEQ). Le calcul du I.TEQ s'effectue en multipliant la concentration de chaque congénère par le facteur international d'équivalence toxique (I.TEF) correspondant. Le calcul du I.TEQ total s'effectue en sommant les I.TEQ des 17 congénères dosés. Dans le cadre de la présente étude, les facteurs internationaux de l'OTAN ont été retenus (cf. norme EN 1948-1 et tableau 8).

En ce qui concerne les PBDD-DF, selon les préconisations formulées par des experts consultés par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et le « United Nations Environment Programme » (UNEP) présentées dans la note de synthèse sur l'état des connaissances sur les dioxines et furanes bromés (INERIS, 2017), des facteurs équivalents toxiques identiques à ceux des congénères de PCDD-DF correspondants (facteurs internationaux de l'OTAN) ont été retenus pour calculer un équivalent toxique en PBDD-DF.

Lorsque des sommes de composés d'une même famille chimique sont effectuées, les masses des congénères inférieures aux seuils de quantification analytiques sont prises égales à la moitié de la limite de quantification et les masses des congénères inférieures aux seuils de détection analytiques sont prises égales à zéro.

Tableau 10 : facteurs d'émission exprimés en masse de polluants émis par kg de déchet brûlé.

Véhicule	Véhicule	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Câbles 1	Câbles 2
Masse brûlée (kg)	1230	359	311	146	518	374	314	470
Perte de masse (kg)	205	119	183	74,4	122	128	110	172
Perte de masse (%)	16,7	33,1	58,8	51,0	23,6	34,2	35,0	36,6
Durée de l'essai (h)	2,55	5,3	4,67	1,37	1,35	5,42	1,43	4,27
Débit extrait (m ³ /h)	62600	24500	20000	30500	45500	25500	39500	42000
Unité	g/kg brûlé							
CO ₂	304	212	631	954	427	573	491	506
CO	9	16	28	14	10	12	41	60
NO _x	0,7	0,5	1,1	5,1	1,9	1,8	1,3	0,6
COVt	3	29	33	2,9	3,7	14	15	24
CH ₄	0,52	1,85	3,0	0,48	0,3	0,57	3,2	5,1
Formaldéhyde	0,12	0,36	0,41	0,18	0,05	0,30	0,11	0,48
HF	0,15	0,01	0,04	0,19	0,31	0,07	1,04	1,04
HCl	0,80	0,43	0,68	2,18	1,27	0,70	22,2	34,7
SO ₂	0,99	< 0,05	0,25	1,3	3,3	2,4	2,4	1,25
Poussières	14	5	10	17	42	6	9	21
Unité	ng I.TEQ/kg brûlé							
PBDD-DF	302	1463	2028	374	78,9	162	13,6	52,9
PCDD-DF	65,8	2307	662	52,2	7,2	3146	2737	2845
PCB	4,6	32,7	14,6	5,7	0,9	54,6	123	289

Tableau 11 : facteurs d'émission exprimés en masse de polluants émis par kg perdu.

Véhicule	Véhicule	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Câbles 1	Câbles 2
Masse brûlée (kg)	1230	359	311	146	518	374	314	470
Perte de masse (kg)	205	119	183	74,4	122	128	110	172
Perte de masse (%)	16,7	33,1	58,8	51,0	23,6	34,2	35,0	36,6
Durée de l'essai (h)	2,55	5,3	4,67	1,37	1,35	5,42	1,43	4,27
Débit extrait (m ³ /h)	62600	24500	20000	30500	45500	25500	39500	42000
Unité	g/kg perdu							
CO ₂	1827	639	1072	1872	1815	1673	1401	1384
CO	53	49	47	28	43,5	34,5	118	164
NO _x	4,1	1,6	1,9	9,9	8,1	5,3	3,8	1,7
COVt	17,8	91	57	5,7	15,6	40,8	44	66,5
CH ₄	3,1	5,6	5,0	1,0	1,4	1,7	9	14
Formaldéhyde	0,7	1,1	0,7	0,35	0,22	0,89	0,3	1,3
HF	0,88	0,04	0,06	0,38	1,32	0,2	2,96	2,8
HCl	4,8	1,31	1,15	4,3	5,4	2,06	63,2	95
HCN	0,9	0,88	0,46	1,47	1,72	0,36	1,39	0,9
SO ₂	5,9	< 0,1	0,42	2,6	13,9	7,1	7,0	3,4
Poussières	83	14	17	33	178	17	27	59
Unité	ng I.TEQ/kg perdu							
PBDD-DF	1811	4340	3446	735	335	474	38,8	633
PCDD-DF	395	6959	1125	102,5	30,6	9191	7814	21480
PCB	27,3	98,5	24,9	11,2	3,9	159,6	351,6	3038

Des conditions de ventilation très différentes n'ont pas pu être testées lors des brûlages des CSR et des câbles électriques en raison notamment des refoulements de fumées hors de la chambre. Dans le cas des CSR, la variabilité en composition des matériaux testés (cf. les pourcentages de perte de masse indiqués dans le tableau 9) semble jouer un rôle bien plus important sur la formation des dioxines et furanes que les conditions de ventilation.

7 Commentaires

7.1 Ensemble des essais

Il ressort de cette campagne d'essais les commentaires suivants :

- Ramenées à la masse de matériaux combustibles brûlée, les émissions de CO₂ varient en fonction des déchets brûlés, notamment en fonction de leur teneur en carbone. Au sein d'une même famille de déchets, ces émissions sont relativement homogènes à l'exception des CSR ;
- Les émissions de CO sont en lien étroit avec la qualité de la combustion. Les émissions les plus fortes sont obtenues lors des feux de câbles électriques. La piètre qualité de combustion observée lors de ces feux participe très probablement à la formation des PCDD-DF et PCB DL ;
- Les émissions de COVT sont également en lien avec la dégradation de la qualité de la combustion et la formation de dioxines et furanes. Les facteurs d'émission de COVT déterminés sont très dispersés. Au-delà de 40 g de COVT émis par kg perdu, les émissions de dioxines et furanes sont élevées. Les COV légers (méthane, éthane, etc.) représentent une part importante de ces émissions. La part de CH₄ dans les émissions de COVT s'élève par exemple entre 4 et 21% selon les essais, celle du formaldéhyde est de l'ordre de 1% sauf dans le cas des banquettes et du véhicule, elle représente alors respectivement 6 et 4% des émissions de COVT environ ;

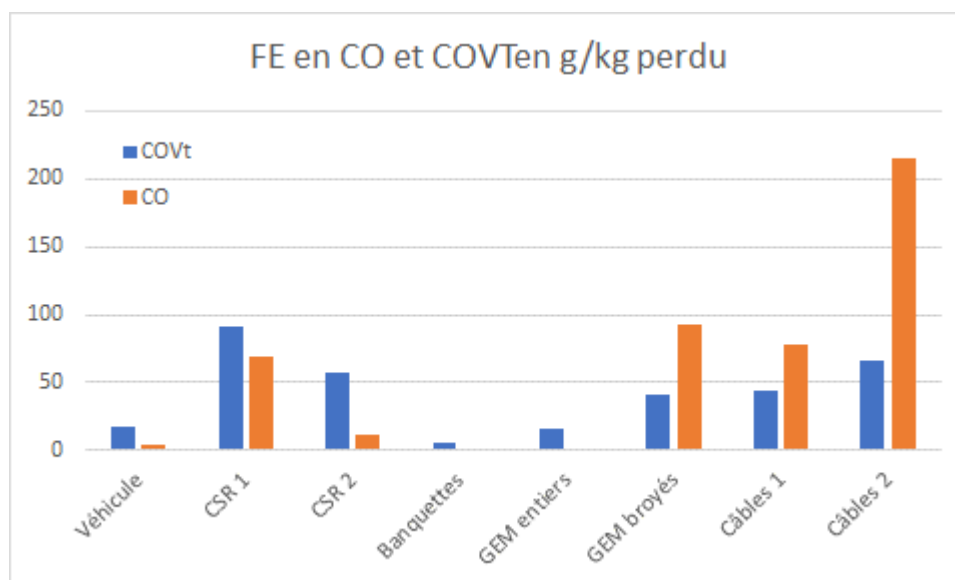


Figure 12 : facteurs d'émission en CO et COVT des différents déchets.

- L'HCl est l'un des principaux gaz acides émis avec des facteurs d'émission qui évoluent dans une fourchette très large, allant de 1 à 95 g/kg perdu. Les facteurs d'émission les plus élevés sont observés lors des brûlages de câbles électriques qui disposent aussi des facteurs d'émission les plus élevés en PCDD-DF. La présence de PVC dans les gaines est à l'origine des émissions de ces polluants. Quant aux facteurs d'émission les plus faibles, ils sont observés dans le cas des brûlages de CSR. Ces déchets disposent par contre des facteurs d'émission les plus élevés en PBDD-DF ;

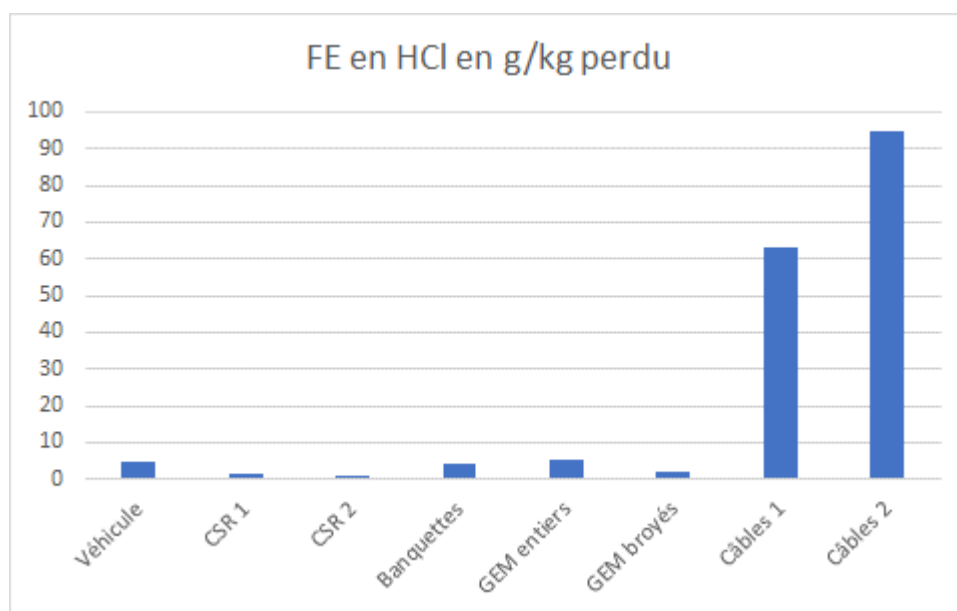


Figure 13 : facteurs d'émission en HCl des différents déchets.

- Comme pour HCl, les émissions les plus élevées de HF sont observées dans le cas des brûlages de câbles électriques (de l'ordre de 2,9 g/kg perdu) ;
- Les émissions de particules évoluent de 14 à 178 g/kg perdu. Les valeurs les plus élevées ont été observées lors du brûlage des GEM entiers et du véhicule. Ces fortes émissions de particules s'expliquent par la présence de certains matériaux tels que les pneus (fortement émetteurs de particules de carbone par combustion) pour les véhicules et probablement les mousses isolantes dans le cas des GEM entiers. Ces fortes émissions de particules ne semblent pas en lien avec les émissions de dioxines et furanes ;

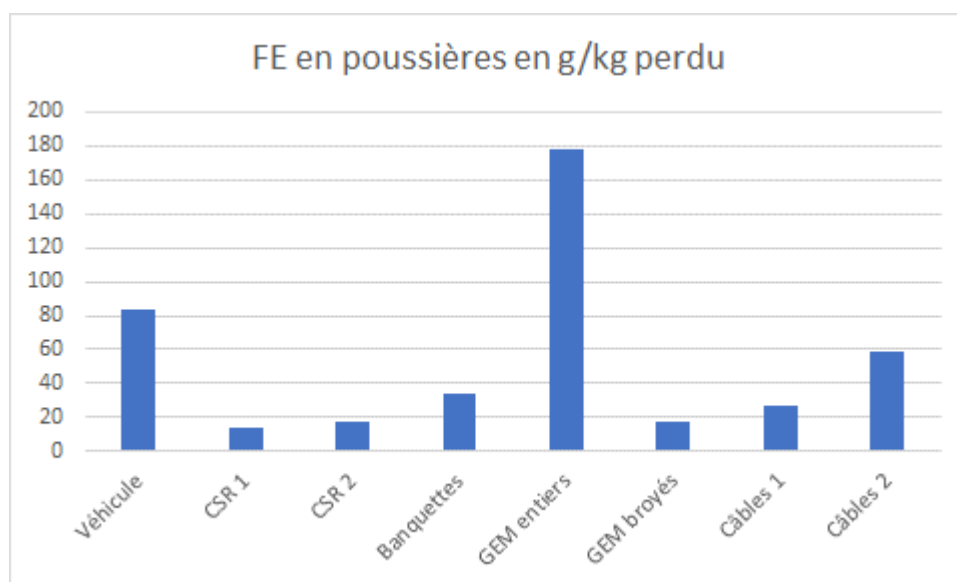


Figure 14 : facteurs d'émission en poussières des différents déchets.

- Les émissions de dioxines et furanes chlorés évoluent fortement en fonction des déchets brûlés. Les brûlages des câbles électriques, des CSR et des GEM broyés sont à l'origine des plus fortes émissions ;

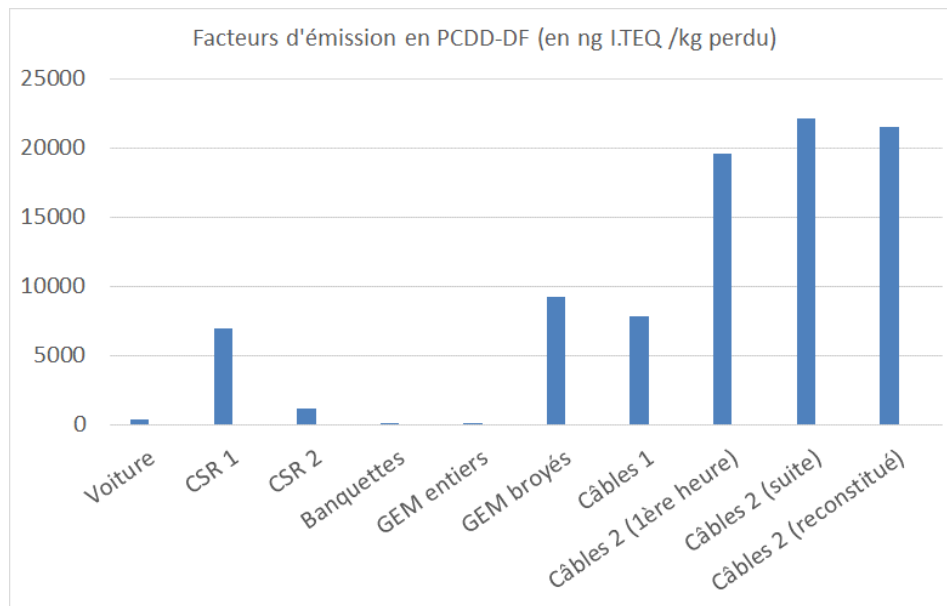


Figure 15 : facteurs d'émission en dioxines et furanes chlorés des différents déchets.

- Les émissions les plus élevées de PCB sont observées lors du brûlage des câbles électriques. En regard des émissions de dioxines et furanes chlorés, les émissions de PCB sont faibles quel que soit le déchet brûlé. En I.TEQ, la part des PCB représente de 1 à 14% des émissions de PCDD-DF ;
- En ce qui concerne les dioxines et furanes bromés,
 - Les facteurs d'émission les plus élevés sont observés lors des brûlages des CSR. Ceux-ci sont connus pour potentiellement contenir d'importantes teneurs en Br liées aux retardateurs de flamme bromés utilisés dans de nombreux matériaux. Les teneurs en brome et en chlore de ces déchets sont susceptibles d'évoluer fortement en fonction de leur provenance. Pour ces déchets, les facteurs d'émission en PBDD-DF sont du même ordre de grandeur que les facteurs d'émission en PCDD-DF ;
 - Le facteur d'émission déterminé lors du brûlage du véhicule est également élevé. Le facteur d'émission en PBDD-DF est 4,5 fois supérieur au facteur d'émission en PCDD-DF. En retenant le facteur d'émission déterminé et le nombre annuel du véhicules brûlés (31880, cf. figure 7), le flux annuel en PBDD-DF émis à l'échelle de l'Île de France serait de 11,8 g environ. Notons que lors du brûlage des véhicules entiers, la quasi-absence d'émissions de retardateurs de flamme bromés a été mise en évidence dans le cadre du projet Cortea Embruve ;
 - Les facteurs d'émission en PBDD-DF déterminés lors des brûlages des autres matériaux sont nettement plus faibles et bien inférieurs aux facteurs d'émission en PCDD-DF (à l'exception des GEM entiers). Dans ces cas, l'impact environnemental serait bien plus en lien avec les émissions de PCDD-DF que de PBDD-DF (cas des câbles électriques notamment et probablement, de façon plus générale, de tous les matériaux électriques).

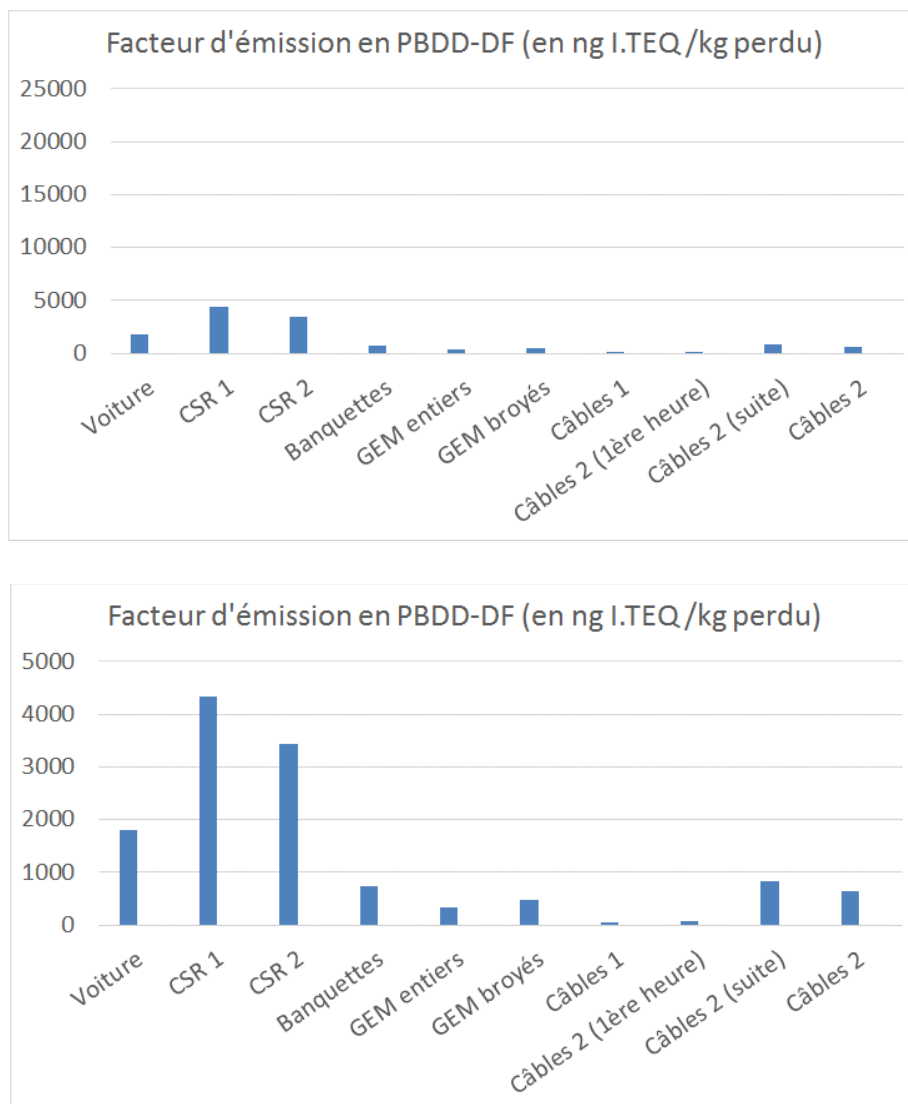


Figure 16 : facteurs d'émission en dioxines et furanes bromés des différents déchets (avec deux échelles distinctes).

7.2 Brûlage de véhicule

Les résultats obtenus pour les dioxines chlorées lors du brûlage du véhicule peuvent être comparés à ceux obtenus dans le cadre d'autres études (projet Cortea Embruve notamment) ou aux données de la littérature.

En préalable, rappelons que tous ces brûlages n'ont pas été effectués dans les mêmes conditions :

- Avec ou sans carburant : sans carburant pour le véhicule testé dans la présente étude tandis que les véhicules testés au cours du projet Embruve contenaient différentes quantités de carburants (30% du plein, 50% du plein, et sans carburant), et le véhicule testé par Lönnermark et al., 2006 ne contenait ni carburant ni batterie. En tenant compte strictement de la masse de carburant par rapport à la masse de matériaux combustibles brûlée, les facteurs d'émission peuvent évoluer de 20% au plus : les facteurs d'émission des véhicules sans carburant étant alors 20% plus forts que ceux des véhicules avec le plein. Cet écart ne tient bien entendu pas compte des émissions du carburant et de l'influence de ce dernier sur les émissions de l'ensemble du véhicule,
- Entiers ou en morceaux : le véhicule testé dans la présente étude ainsi que les véhicules testés au cours du projet Embruve ont été brûlés entiers, le véhicule testé par Lönnermark et al., 2006 a été brûlé entier mais en trois brûlages successifs, seuls les matériaux combustibles du véhicule R (projet Embruve) ont été brûlés,

- Avec une mise à feu différente : au niveau du bloc moteur pour le véhicule testé dans la présente étude ainsi que pour un véhicule testé dans le cadre du projet Embruve (cet allumage est jugé plus représentatif d'un mode d'allumage accidentel), au niveau du siège avant conducteur pour les deux autres véhicules testés au cours du projet Embruve, en trois points distincts (moteur, siège et ensemble du véhicule) pour le véhicule testé par Lönnermark et al., 2006,
- Avec des conditions de ventilation différentes (calorimètre de 3 m x 4 m pour le véhicule testé par Lönnermark et al., 2006, tunnel ventilé de 3 m x 3 m dans le cas du projet Cortea Embruve, chambre 1000 m³ ventilée pour la présente étude).

Les émissions de HCl semblent en lien avec la taille des véhicules (cf. figure 17).

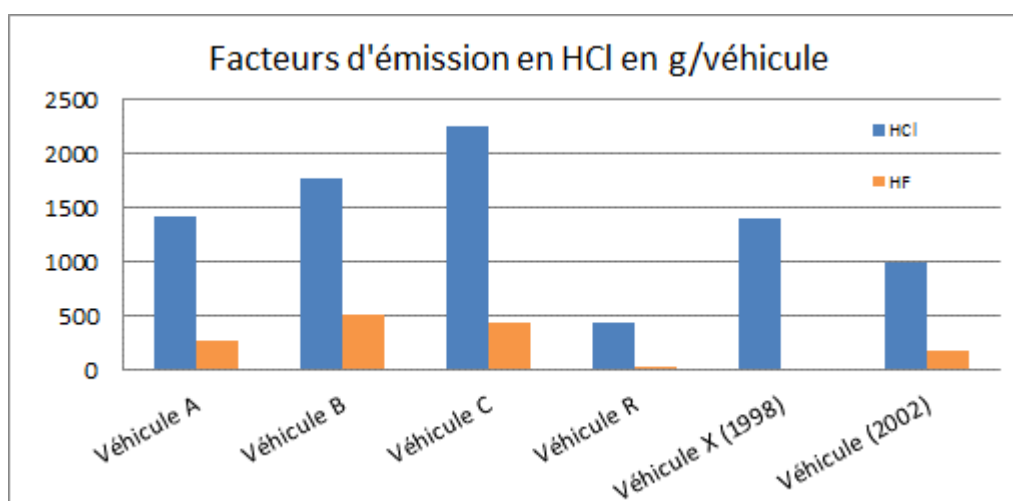


Figure 17 : facteurs d'émission en HCl de différents véhicules (véhicules A, B, C (gamme haute) et R (citadine) : projet Cortea Embruve, véhicule X (1998, gamme intermédiaire) : Lönnermark et al., 2006 ; véhicule (2002, gamme intermédiaire) : présente étude).

Les émissions de HF sont liées à la présence de gaz fluorés réfrigérants du système de climatisation des véhicules (générations d'un pic de HF lors du perçage du circuit frigorifique), ce qui explique l'absence de ce polluant dans les véhicules plus anciens non équipés de climatisation (probablement le cas du véhicule X) et dans le véhicule R (reconstitué à partir des divers matériaux combustibles présents dans ce véhicule et brûlés séparément).

Le facteur d'émission en particules est proche des facteurs d'émission déterminés dans le cadre d'autres études et des facteurs d'émission correspondants aux brûlages de pneus (119 g/kg Lemieux et al. 1993 - 83,3 g/kg pneus entiers Ineris 2011). Lönnermark et al., 2006 soulignent qu'un grand nombre de particules à un diamètre inférieur à 1 µm.

Les facteurs d'émission en dioxines et furanes chlorés se situent dans le haut de la fourchette des valeurs de la littérature. Ces émissions proviennent essentiellement du brûlage des matériaux électriques présents dans le véhicule (cf. projet Cortea Embruve). La présence de PVC en plus ou moins grande quantité notamment dans les gaines des câbles électriques et les conditions d'essais forts différentes selon les études sont probablement à l'origine des variations observées. Exprimée en µg I.TEQ/véhicule, la valeur déterminée (81 µg I.TEQ/véhicule, cf. figure 18) est sensiblement plus élevée que celles déterminées dans le cadre du projet Cortea Embruve de 2013 (véhicules A, B, C et R de la figure 18, valeurs comprises entre 5 et 28 µg I.TEQ/véhicule) sur des véhicules plus récents dans des conditions assez similaires (chambre d'essais de dimensions différentes). Elle est relativement comparable aux facteurs d'émission de la littérature établis par Lönnermark et al. en 2006 sur un véhicule de gamme intermédiaire (71 µg I.TEQ/véhicule, véhicule de 1998) et par Wichmann et al. en 1995 sur deux véhicules, l'un ancien datant de 1974 (32 µg I.TEQ/véhicule) et l'autre plus récent datant de 1988 avec une carrosserie en fibre de verre (44 µg I.TEQ/véhicule) ; notamment compte tenu des conditions d'essais utilisées (brûlage dans un tunnel), de la méthodologie de prélèvement employée (collecte des dépôts de polluants sur une surface) et des caractéristiques des véhicules testés. Ces émissions sont essentiellement constituées de furanes (cf. figure 19).

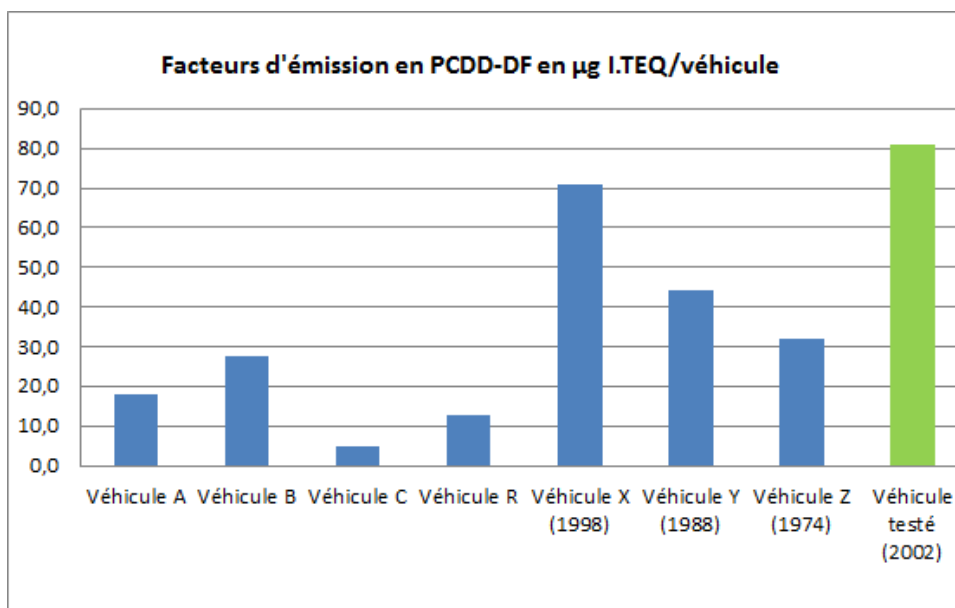


Figure 18 : facteurs d'émission en PCDD-DF des différents véhicules.

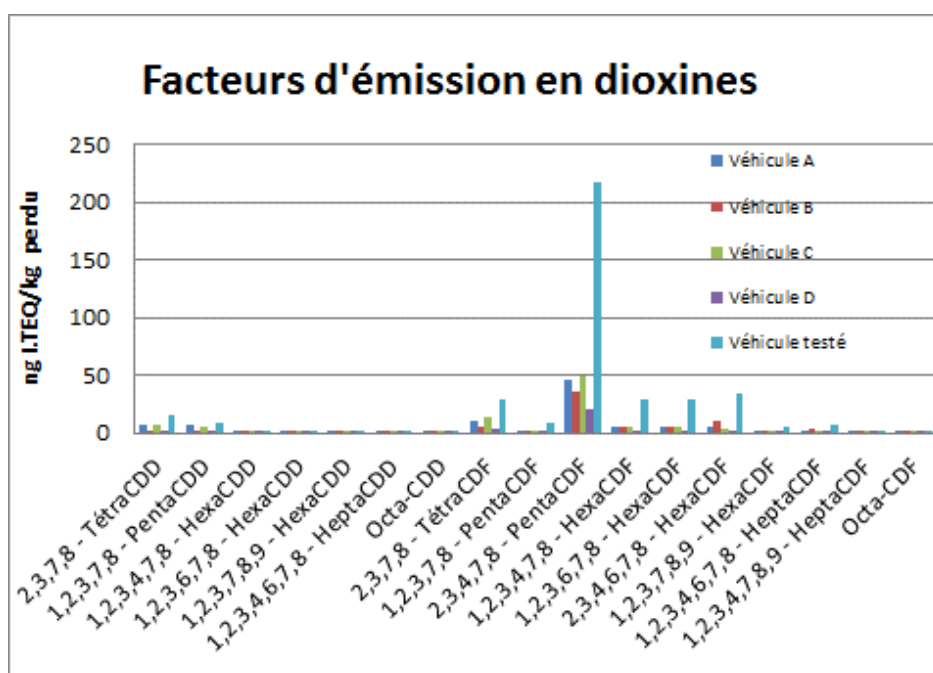


Figure 19 : profil des congénères de dioxines et furanes chlorés lors de brûlages de véhicules.

Concernant les émissions de dioxines et furanes bromés, aucune donnée n'a été recensée dans la littérature internationale. Notons que le facteur d'émission en PBDD-DF exprimé en équivalent toxique est 4,5 fois supérieur au facteur d'émission en PCDD-DF. La contribution des banquettes aux émissions en PBDD-DF d'un véhicule est a priori faible, de l'ordre de 2,5% (le facteur d'émission relatif aux banquettes est bien plus faible que celui du véhicule et les banquettes ne représentent que 6% de la masse perdue par un véhicule (cf. projet Cortea Embruve)).

7.3 Câbles électriques

Deux essais de brûlages de câbles électriques de bâtiment ont été effectués. Même si ces pratiques sont interdites, ces brûlages sont largement répandus afin de récupérer le cuivre contenu dans ces matériaux. Les facteurs d'émission déterminés lors de ces essais sont très élevés (2,74 et 2,85 µg

I.TEQ/kg brûlé), ce qui confirme les résultats obtenus par l'Ineris lors d'études précédentes menées à plus petites échelles en 2013 dans le cadre du Projet Cortea Embruve (1,67 µg I.TEQ/kg brûlé - brûlage de 80 kg de câbles) et 1999 (Ineris 1999 - facteur d'émission moyen de 1 µg I.TEQ/kg brûlé, plusieurs essais avaient été menés avec 2 kg de câbles par essai) et par Gullett et al., 2007 (11,9 µg I.TEQ/kg brûlé).

Lors du second essai mené, deux prélèvements distincts ont été effectués, le premier couvrant la première heure d'essai, le second le reste de l'essai jusqu'à extinction du feu. Les résultats mettent en évidence de très fortes émissions de dioxines et furanes chlorés durant la première heure de l'essai en lien avec la quantité de matière perdue. Ainsi, exprimés en µg I.TEQ/kg perdu, les facteurs d'émission évoluent peu entre une période de combustion vive (première heure d'essai) et une période de combustion sans flamme (durant le reste de l'essai). En regard des valeurs déterminées pour les dioxines et furanes chlorés, les facteurs d'émission en PBDD-DF en équivalent toxique sont très faibles, de l'ordre de 0,05 µg I.TEQ/kg brûlé.

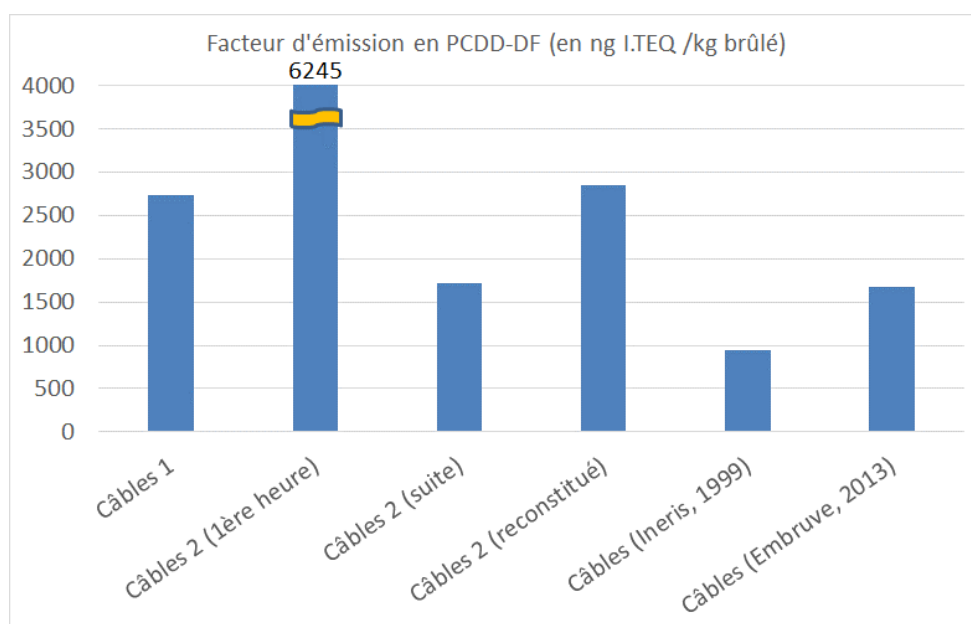


Figure 20 : facteurs d'émission en PCDD-DF des câbles électriques.

7.4 Valeurs cumulées (somme des facteurs d'émission en PCDD-DF, PCB DL et PBDD-DF)

Les valeurs cumulées des facteurs d'émission exprimés en équivalent toxique sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 12 : facteurs d'émission cumulés et contribution de chaque famille chimique.

Matériaux brûlés	Facteurs d'émission cumulés	Contribution PCDD-DF	Contribution PCB DL	Contribution PBDD-DF
Unité	µg I.TEQ/kg perdu	%	%	%
Véhicule	2 233	17,7	1,2	81,1
CSR 1	11 398	61,1	0,9	38,1
CSR 2	4 596	24,5	0,5	75,0
Banquettes	849	12,0	1,3	86,7
GEM entiers	370	8,1	1,1	90,8
GEM broyés	9 825	93,5	1,6	4,8
Câbles 1	8 205	95,2	4,3	0,7
Câbles 2	25 151	85,4	12,1	2,5

La contribution des PBDD-DF aux émissions exprimées en équivalent toxique est très variable en fonction des matériaux brûlés, très probablement en fonction de leurs teneurs en chlore, en brome et en RFB. Lorsque la teneur en chlore du matériau est très élevée et la teneur en brome faible (cas des câbles électriques), la formation de PBDD-DF est quasi-négligeable.

Lorsque les facteurs d'émission en PCDD-DF sont très élevés (> 8 µg I.TEQ/kg perdu), la contribution des PBDD-DF est plus faible (câbles, GEM broyés et dans une moindre mesure CSR 1). Dans les autres cas, la contribution des PBDD-DF est très majoritaire (> 75%).

Quant aux polychlorobiphényles de type dioxines (PCB DL), ils représentent une faible (moins de 12% lors des brûlages de câbles électriques) voire très faible part de l'équivalent toxique global (moins de 2% lors des brûlages des autres matériaux).

8 Conclusions

Cette étude avait pour objectif d'améliorer les connaissances sur les émissions de dioxines et furanes bromés de feux de déchets accidentels ou sauvages.

Les dioxines bromées ont en effet été mesurées dans l'air ambiant au cours de l'année 2017 en région francilienne. La présence de ces composés pourrait être liée à des combustions non maîtrisées (potentiels brûlages de déchets ou autres sources) (Airparif, 2018).

Elle a permis la mesure en chambre de combustion d'émissions de dioxines et furanes bromés sur différentes typologies de matériaux susceptibles de contenir des composés bromés.

Une étude bibliographique a été menée pour préciser les matériaux les plus pertinents pour la réalisation de mesures au regard de l'accidentologie, de leur composition chimique (métaux pouvant servir de catalyseurs, composés bromés), de leur potentiel d'émission de dioxines lors de combustion et des quantités de déchets collectées. Cette étude a conduit à retenir 5 matériaux distincts pour la mise en œuvre d'essais de brûlages : des gros appareils électroménagers broyés et entiers (GEM), des câbles électriques, un véhicule automobile, des banquettes de voiture et des combustibles solides de récupération (CSR).

Les essais ont été menés dans une chambre de 1000 m³ de l'Ineris, ventilée afin de simuler des brûlages à l'air libre ou incendies, avec de grands volumes de matériaux (plusieurs centaines de kg par essai).

Les résultats de cette étude expérimentale confirment l'émission de dioxines bromées lors du brûlage de déchets contenant des composés bromés. Des facteurs d'émission très variables sont obtenus selon les déchets étudiés, très probablement en fonction de leurs teneurs en chlore et en brome.

Les PBDD-DF peuvent contribuer de façon très majoritaire à l'équivalent toxique global (en retenant pour ces composés des facteurs équivalents toxiques identiques à ceux des congénères chlorés comme recommandé par les experts consultés par l'OMS) dans un bon nombre de cas (brûlages des CSR, GEM et véhicules notamment, matériaux connus pour contenir des retardateurs de flamme bromés). Lorsque les facteurs d'émission en PCDD-DF sont élevés, la contribution des PBDD-DF est moindre, voire négligeable dans le cas des brûlages des câbles électriques notamment (ceux-ci contenant a priori peu de brome ; Gullett et al., 2007).

Il ressort de cette étude la nécessité de considérer comme substances d'intérêt les dioxines et furanes bromés dans le cadre de la stratégie de prélèvements et d'analyses en situation post-accidentelle après un incendie, selon les matériaux brûlés. En outre, sur la base des concentrations mesurées en chambre de combustion, des scénarios réalistes de feux de déchets pourraient être élaborés pour modéliser les émissions de dioxines et furanes bromés et ainsi évaluer l'exposition des populations riveraines à de potentielles combustions non maîtrisées ainsi que les impacts sanitaires associés.

9 Références

- ADEME. (2015). Combustibles solides de récupération (CSR) - Caractérisation et évaluation de leurs performances en combustion.
- ADEME. (2017a). Expositions environnementales aux dioxines et risque de cancer du sein dans la cohorte E3N.
- ADEME. (2017b). Pneumatiques - Données 2016.
- ADEME. (2017c). Rapport Annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques - Données 2016.
- AIRPARIF. (2018). Étude des dioxines chlorées et bromées dans l'air ambiant à proximité de sources diffuses.
- ANSES. (2017). Connaissances relatives à la réglementation, à l'identification, aux propriétés chimiques, à la production et aux usages des substances de la famille des polyromés - Tome 1.
- Anzano, M., Collina, E., Piccinelli, E., & Lasagni, M. (2017). Lab-scale pyrolysis of the Automotive Shredder Residue light fraction and characterization of tar and solid products. *Waste Management*, 64, 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.013>
- Cai, C. Y., Yu, S. Y., Liu, Y., Tao, S., & Liu, W. X. (2018). PBDE emission from E-wastes during the pyrolytic process: Emission factor, compositional profile, size distribution, and gas-particle partitioning. *Environmental Pollution*, 235(January), 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.068>
- Chen, Y., Li, J., Chen, L., Chen, S., & Diao, W. (2012). Brominated Flame Retardants (BFRs) in Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Plastics and Printed Circuit Boards (PCBs). *Procedia Environmental Sciences*, 16, 552-559. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.076>
- Choi, J., Jang, Y. C., & Kim, J. G. (2017). Substance flow analysis and environmental releases of PBDEs in life cycle of automobiles. *Science of the Total Environment*, 574, 1085-1094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.027>
- Cortea Embruve (2013). Amélioration de la connaissance des émissions atmosphériques liées au brûlage de véhicules. Contribution de cette source à l'inventaire national d'émission. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME dans le cadre de la Décision n°11-81C0087
- Drage, D. S., Aries, E., & Harrad, S. (2014). Studies into the formation of PBDEs and PBDD-Fs in the iron ore sintering process. *Science of the Total Environment*, 485-486(1), 497-507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.093>
- Evans, R., & Evans, A. (2006). The Composition of a Tyre : Typical Components. Consulté à l'adresse http://www2.wrap.org.uk/downloads/2_-_Composition_of_a_Tyre_-_May_2006.0c1f8c06.2856.pdf
- Gullett, B. K., Linak, W. P., Touati, A., Wasson, S. J., Gatica, S., & King, C. J. (2007). Characterization of air emissions and residual ash from open burning of electronic wastes during simulated rudimentary recycling operations. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(1), 69-79. <https://doi.org/10.1007/s10163-006-0161-x>
- Hennebert, P., & Filella, M. (2018). WEEE plastic sorting for bromine essential to enforce EU regulation. *Waste Management*, 71, 390-399. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.031>
- Huron, M., Oukala, S., Lardière, J., Giraud, N., & Dupont, C. (2017). An extensive characterization of various treated waste wood for assessment of suitability with combustion process. *Fuel*, 202, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.025>
- INERIS (1999). Emissions de PCDD-DF lors de la combustion de câbles électriques : DRC-KAd/AR-99-21439/cr99-347.
- INERIS (2011). Facteurs d'émission de feux simulés de déchets et de biomasse, Rapport d'étude : DRC-11-118389-04583A, disponible en ligne sur www.ineris.fr.
- INERIS. (2013). Application des MTD dans l'industrie du traitement du bois : Etat des lieux 2013.
- INERIS. (2017a). *Note de synthèse sur l'état des connaissances sur les dioxines et furannes bromés (PBDD-DF) - DRC-17-164541-02799A*.

INERIS. (2017). Tri et classement des plastiques des déchets d'équipement électriques et électroniques DRC-17-164547-01461C.

INERIS. (2018). Maitrise des risques dans les filières de recyclage des déchets contenant des substances dangereuses : Cas des plastiques des DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés.

JORF. Décret n°2004-1227 du 17 novembre 2004 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi de l'arsenic et de ses composés, du colorant bleu, du pentabromodiphényléther et de l'octabromodiphényléther et modifiant le décret n°92-1074 du 2 octobre 1992 (2004). <https://doi.org/10.1051/dmmbd/120108>

Kajiwara, N., Takigami, H., Kose, T., Suzuki, G., & Sakai, S. (2015). Flame Retardants and Related Substances in the Interior Parts and Cabin Dusts of End-of-life Vehicles (4th Report). *Organohalogen Compounds*, 76, 1022-1025.

Lavric, E. D., Konnov, A. A., & De Ruyck, J. (2004). Dioxin levels in wood combustion - A review. *Biomass and Bioenergy*, 26(2), 115-145. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00104-1)

Lönnermark, A., & Blomqvist, P. (2005). Emissions from Tyre Fires.

Lönnermark, A., & Blomqvist, P. (2006). Emissions from an automobile fire. *Chemosphere*, 62(7), 1043-1056.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.002>

Mancini, G., Tamma, R., & Viotti, P. (2010). Thermal process of fluff: Preliminary tests on a full-scale treatment plant. *Waste Management*, 30(8-9), 1670-1682. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.037>

Mancini, G., Viotti, P., Luciano, A., & Fino, D. (2014). On the ASR and ASR thermal residues characterization of full scale treatment plant. *Waste Management*, 34(2), 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.002>

Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer. (2016). Panorama de l'accidentologie des installations de gestion des déchets.

Morin, N. A. O., Andersson, P. L., Hale, S. E., & Arp, H. P. H. (2017). The presence and partitioning behavior of flame retardants in waste, leachate, and air particles from Norwegian waste-handling facilities. *Journal of Environmental Sciences*, 62, 115-132. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.09.005>

Ni, H. G., Lu, S. Y., Mo, T., & Zeng, H. (2016). Brominated flame retardant emissions from the open burning of five plastic wastes and implications for environmental exposure in China. *Environmental Pollution*, 214, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.049>

Organtini, K. L., Myers, A. L., Jobst, K. J., Cochran, J., Ross, B., McCarry, B., ... Dorman, F. L. (2014). Comprehensive characterization of the halogenated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran contents of residential fire debris using comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time of flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1369, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.09.088>

Ortuno, N., Conesa, J. A., Molto, J., & Font, R. (2014). De Novo Synthesis of Brominated Dioxins and Furans. *Environmental Science & Technology*, 48(14), 7959-7965.

Ortuño, N., Lundstedt, S., & Lundin, L. (2015). Emissions of PBDD/Fs, PCDD-DFs and PBDEs from flame-retarded high-impact polystyrene under thermal stress. *Chemosphere*, 123, 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.085>

RECORD. (2014). Valorisation énergétique des résidus de broyage des Véhicules Hors d'Usage.

RECORD. (2016). Emissions de molécules halogénées (hors chlore) et de particules fines par les incinérateurs - Etude de la formation/transformation de ces polluants et des techniques d'abattement associées. N°14-0246/1A.

Rey, L., Conesa, J. A., Aracil, I., Garrido, M. A., & Ortuño, N. (2016). Pollutant formation in the pyrolysis and combustion of Automotive Shredder Residue. *Waste Management*, 56(December 2017), 376-383. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.045>

Turner, A., & Filella, M. (2017). Bromine in plastic consumer products – Evidence for the widespread recycling of electronic waste. *Science of the Total Environment*, 601-602, 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.173>

Wichmann, H., Lorenz, W., & Bahadir, M. (1995). Release of PCDD-DF and PAH during vehicle fires in traffic tunnels. *Chemosphere*, 31(2), 2755-2766. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00131-Q](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00131-Q)

Zelinski, V., Lorenz, W., & Bahadir, M. (1993). Brominated flame retardants and resulting PBDD/F in accidental fire residues from private residences. *Chemosphere*, 27(8), 1519-1528. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90246-2](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90246-2)

Zhang, M., Buekens, A., & Li, X. (2016). Brominated flame retardants and the formation of dioxins and furans in fires and combustion. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.014>

10 Liste des annexes

Repère	Désignation	Nb pages
Annexe 1	Contrôles qualité	2
Annexe 2	Fiches d'essais	24
Annexe 3	Résultats (teneurs et facteurs d'émission) par congénère	2

Annexe 1 : contrôles qualité

Blancs de site

Ces blancs sont effectués en prélevant un volume d'effluent gazeux similaire à celui des autres essais. Lors de la réalisation des blancs, la chambre fonctionne dans les mêmes conditions de ventilation que lors des essais sans brûlage des matériaux. Ces blancs comprennent les éventuelles contaminations des lignes de prélèvement et celles qui auraient pu se produire lors des différentes phases des mesurages. Ils permettent notamment d'évaluer le degré de contamination de la chambre, le relargage entre chaque essai et d'en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

Les résultats des teneurs en PCDD-DF, PCB DL et PBDD-DF mesurées lors de l'ensemble des essais (y compris lors des trois blancs de site) sont présentés dans le tableau ci-après.

Essais	Blanc 1	Voiture	Blanc 2	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Blanc 3	Câbles 1	Câbles 2 (1ère heure)	Câbles 2 (suite)
Teneurs en PCDD-DF (en pg L _{TEQ} / m ₀ ³)	2	507	1	5369	2234	183	58	8585	550	15029	77032	4257
Teneurs en PCB DL (en pg L _{TEQ} / m ₀ ³)	0,5	35	0,2	76	49,4	20,2	7,6	149	20,4	676	3526	722
Teneurs en PBDD-DF (en pg L _{TEQ} / m ₀ ³)	76	2326	98	3348	6841	1320	648	443	51	75	253	158

Tableau 1 : teneurs en PCDD-DF, PCB DL et PBDD-DF mesurées lors des essais.

Les teneurs mesurées lors des deux premiers blancs sont très faibles. Les teneurs en PCDD-DF et PCB DL mesurées lors du troisième blanc sont plus élevées. Ce blanc est donc susceptible d'avoir été contaminé par l'essai précédent : le brûlage des GEM broyés dont les teneurs en PCDD-DF et PCB DL sont élevées.

Ces résultats mettent en évidence la très faible contamination d'un essai à l'autre. Seuls les essais qui présentent de très faibles teneurs en polluants sont susceptibles d'avoir été contaminés, ce qui pourrait être le cas de l'essai banquettes par l'essai CSR 2.

Autres contrôles qualité

Différents tests permettent de s'assurer de la fiabilité et de la qualité des essais effectués.

Les contrôles qualité suivants ont été réalisés durant les mesurages :

- Mise en œuvre des méthodes sur site selon les normes en vigueur : aucune non-conformité notable (qui aurait pu conduire à une invalidation des résultats) n'a été relevée lors des mesurages sur site ;
- Tests de fuite réalisés au début et à la fin de chaque essai : concluants, taux de fuite inférieur à 2 % du débit nominal ;
- Vérification de l'isocinétisme : conforme, valeurs comprises entre -5 et +15% par rapport à l'état isocinétique idéal ;
- Blancs de site : dans le cas présent, les résultats des blancs de site ne peuvent être comparés à la VLE (cf. paragraphe précédent) ;
- Taux de récupération de chaque marqueur isotopique (¹³C₁₂) en PCDD-DF et PCB DL ajouté avant prélèvement pour les contrôles périodiques : conforme aux exigences minimales de mesurage ;
- Taux de récupération de chaque marqueur isotopique (¹³C₁₂) en PCDD-DF et PCB DL ajouté avant prélèvement pour les mesures semi-continues : conforme aux exigences minimales de mesurage ;
- Efficacité d'extraction : les taux de réapparition des marqueurs isotopiques (¹³C₁₂) en PCDD-DF et PCB DL injectés avant extraction sont conformes aux exigences minimales de mesurage.

Annexe 2 : fiches d'essais

Essai N°1

INERIS

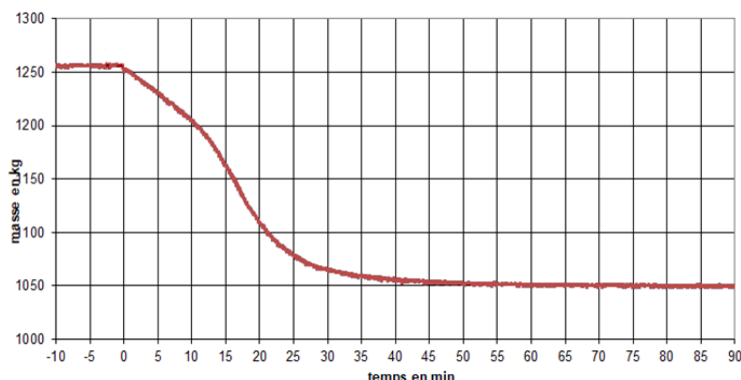
maîtriser le risque pour un développement durable

Type de matériaux :	Renault megan 1.9D de 2002 diesel
Date de l'essai	22/05/2018
Heure de début du prélèvement d'air	11:20
Heure de fin du prélèvement d'air	13:53
Durée du prélèvement d'air	02:33
Poids au début de l'essai (kg)	1230
Poids à la fin de l'essai (kg)	1025
Perte de masse durant l'essai (kg)	205
Pourcentage de masse perdue	16,7
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	62000
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	52500
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	68500

N° CGR: 170785

Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand

variation de la masse de l'échantillon au cours de l'essai



Disposition des matériaux et conditions d'allumage La voiture fut placée au centre de la plaque de 5m sur 5m. Les deux fenêtres arrière étaient ouvertes tandis que les deux fenêtres avant étaient fermées. La voiture fut allumée avec l'aide d'un bruleur à gaz disposé à l'arrière du véhicule. Le bruleur resta activé une dizaine de minutes.

Remarques sur la combustion

masse des composés émis pendant la combustion

	CO2	CO	Hct	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	382,5	10,8	nd	0,6	0,5	0,1	1,0	0,2	0,0
analyseurs	374,5	11,0	3,6			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

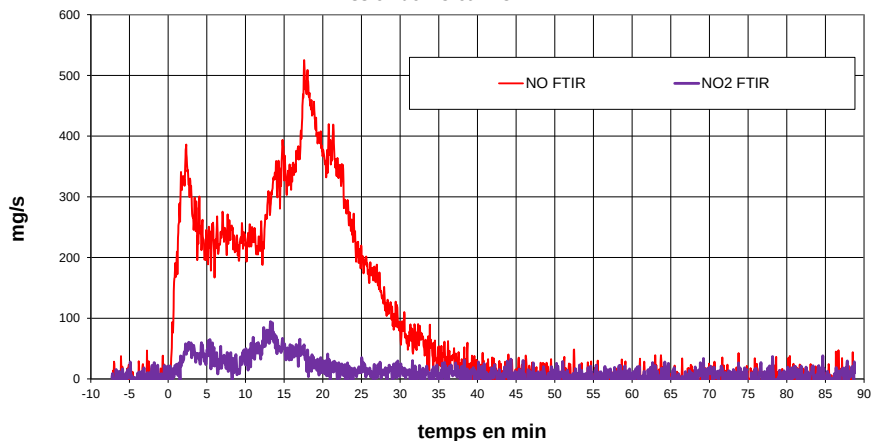
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)

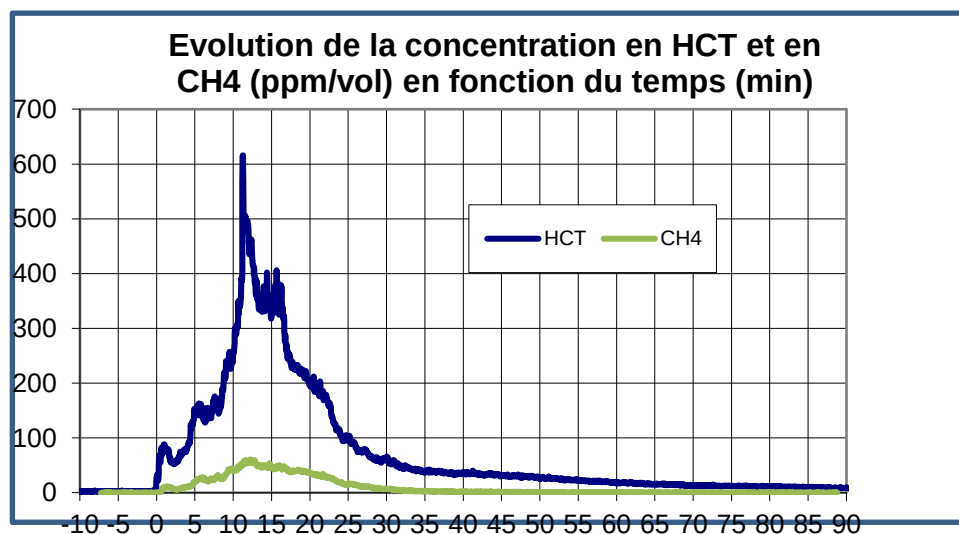
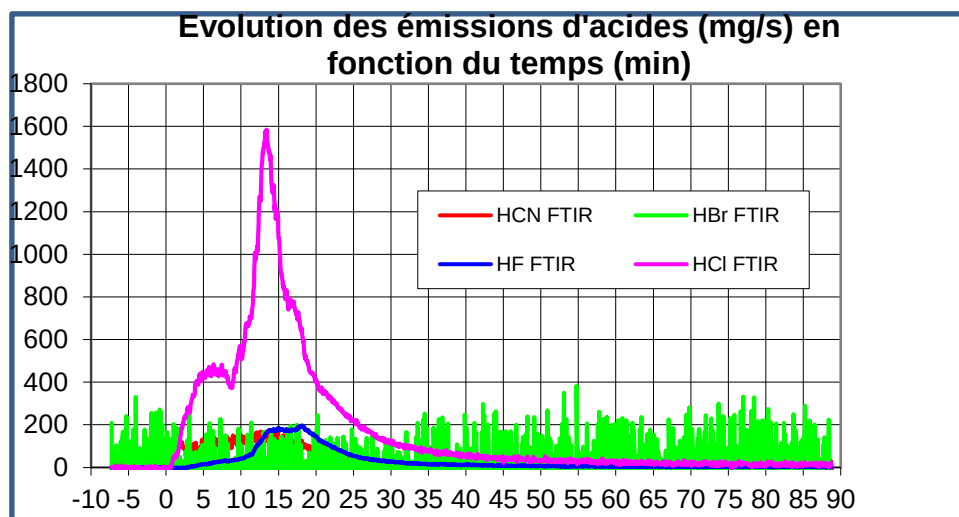
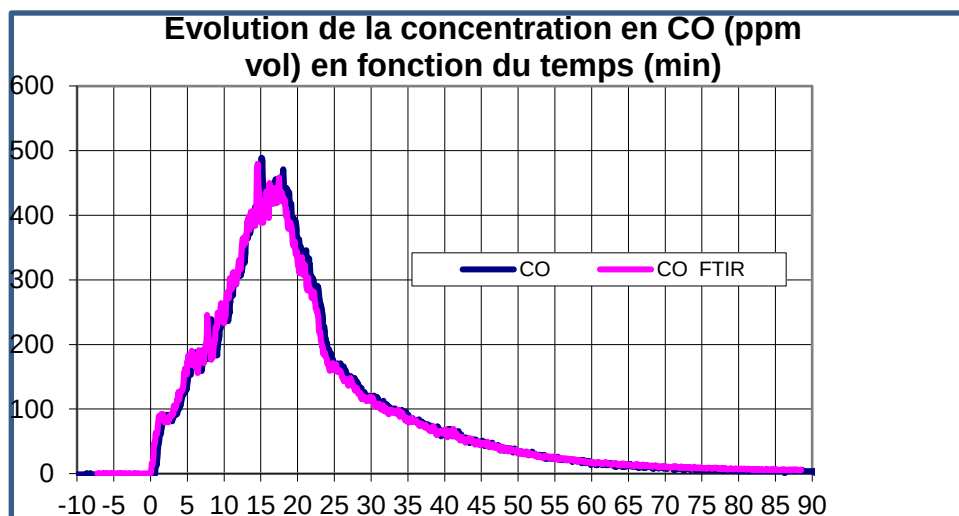
	CO2	CO	Hct	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1865,8	52,6	nd	3,1	2,5	0,3	4,8	0,9	0,2
analyseurs	1826,7	53,4	17,8						

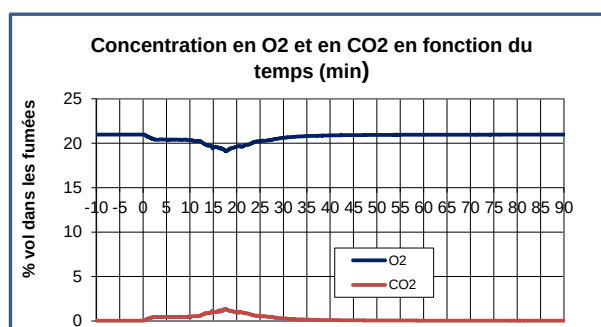
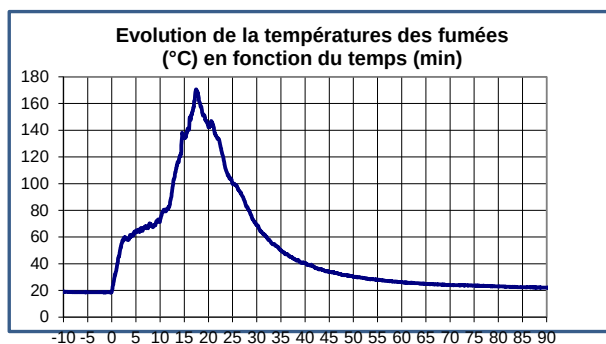
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)

	CO2	CO	Hct	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	311	9	nd	1	0	0	1	0	0
analyseurs	305	9	3	0	0	nd	nd	nd	nd

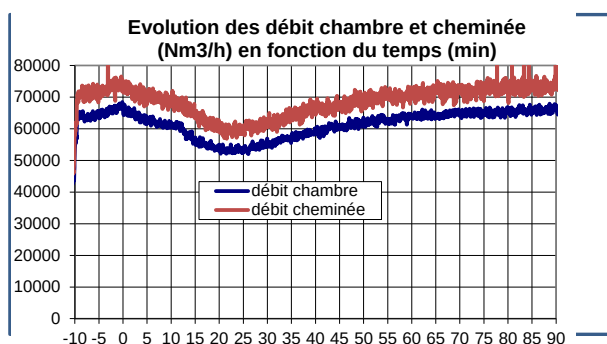
Emission de NO et N2O







Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion



Matériaux après combustion

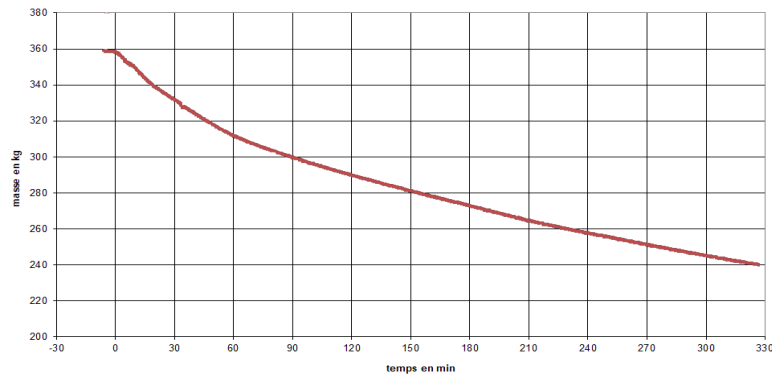


Essai N°2
INERIS
maitriser le risque
pour un développement durable

Type de matériaux :	Combustibles solides de récupération
Date de l'essai	28/05/2018
Heure de début du prélèvement d'air	10:15
Heure de fin du prélèvement d'air	15:33
Durée du prélèvement d'air	05:18
Poids au début de l'essai (kg)	359
Poids à la fin de l'essai (kg)	240
Perte de masse durant l'essai (kg)	119
Pourcentage de masse perdue	33,1
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	24500
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	22500
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	27000

N° CGR:170785

Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand

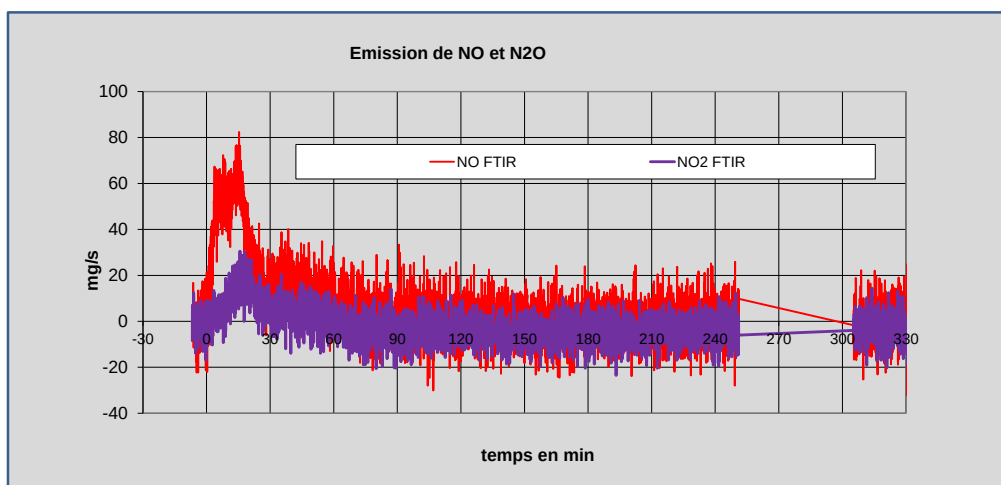
Variation de la masse de l'échantillon au cours de l'essai


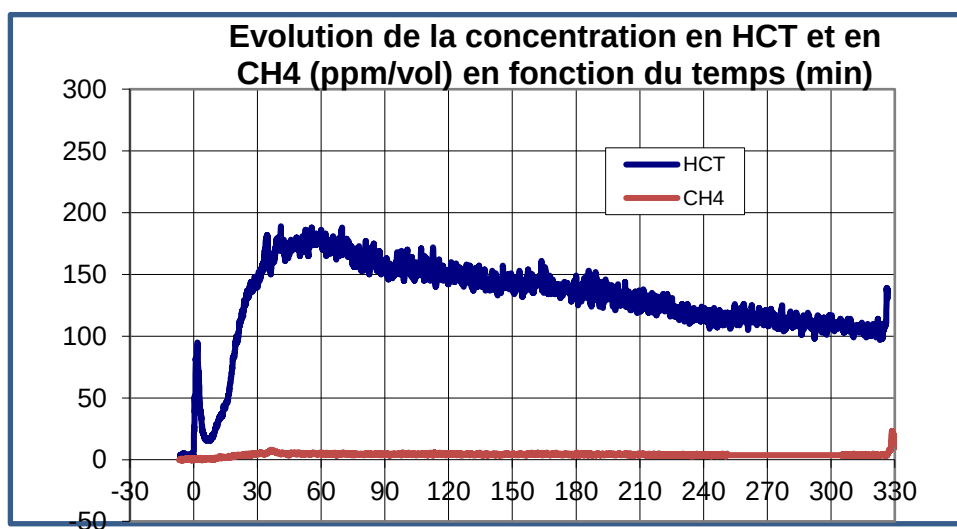
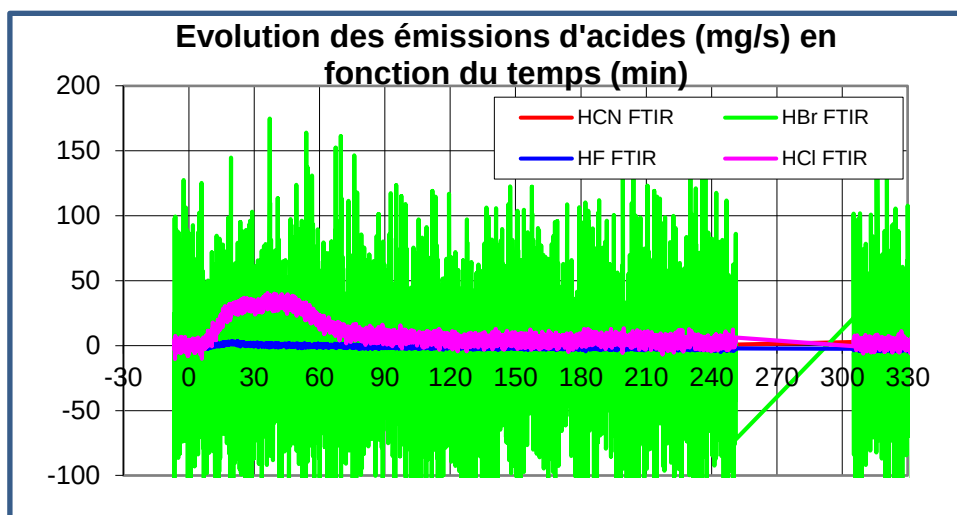
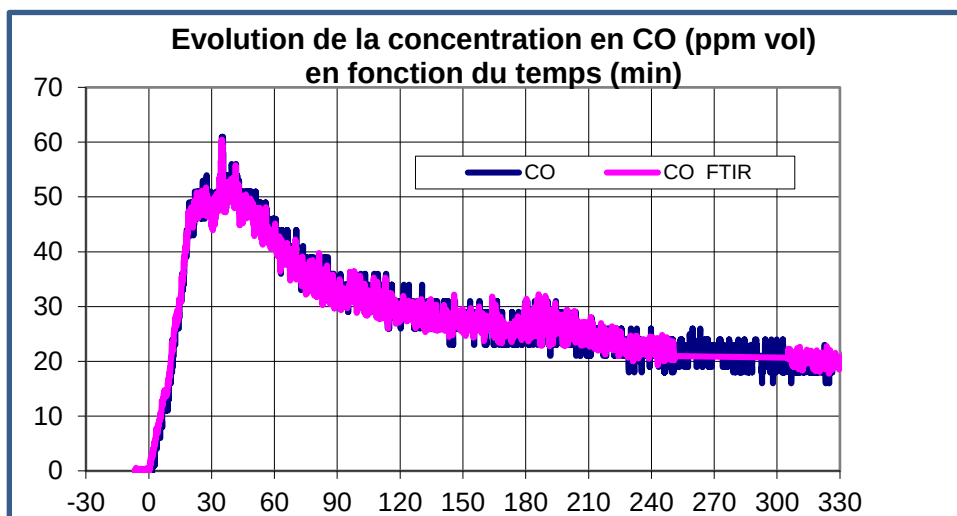
Disposition des matériaux et conditions d'allumage	Les CSR furent équitablement placés à l'intérieur de 4 bacs en fêrailles collés. Le premier mesurait 220*50 cm, le second 220*80, le troisième 200*50 et le dernier 202*86. 4 Bruleurs furent allumés pendant une dizaine de minutes pour faire démarrer la combustion.
Remarques sur la combustion	-

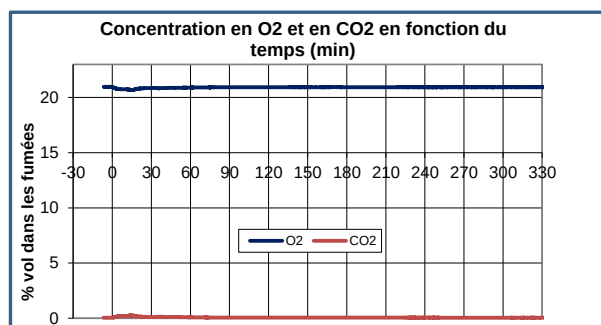
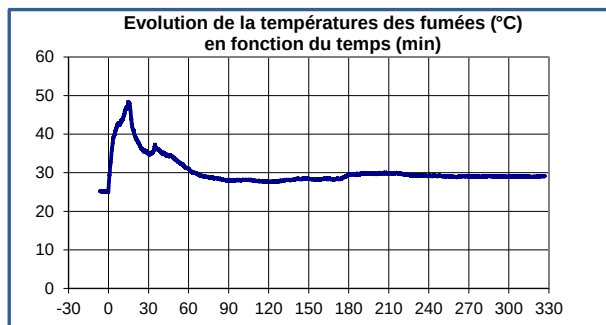
masse des composés émis pendant la combustion									
	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	91,6	5,7	nd	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	76,0	5,7	10,6			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)									
	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	769,5	48,2	nd	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	638,6	48,2	88,7						

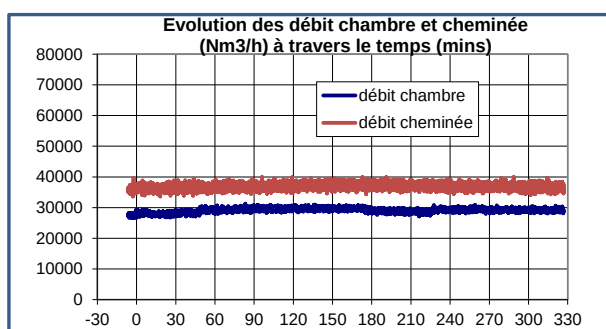
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)									
	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	255	16	nd	2	0	0	0	0	0
analyseurs	212	16	29	0	0	nd	nd	nd	nd







Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion

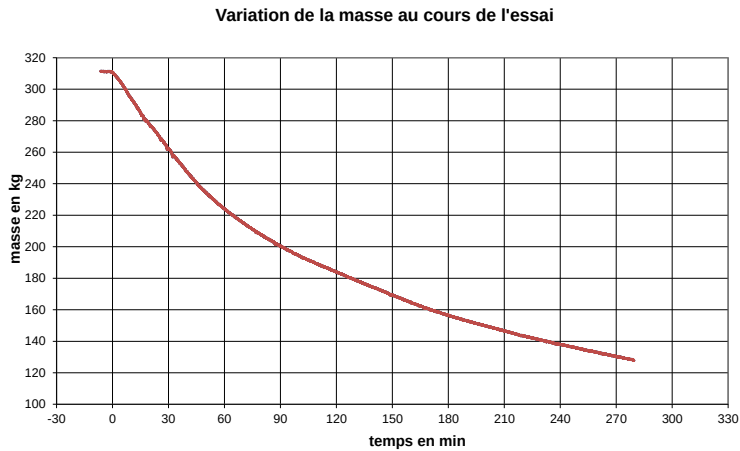


Matériaux après combustion



Essai N°3
INERIS
*maîtriser le risque
pour un développement durable*

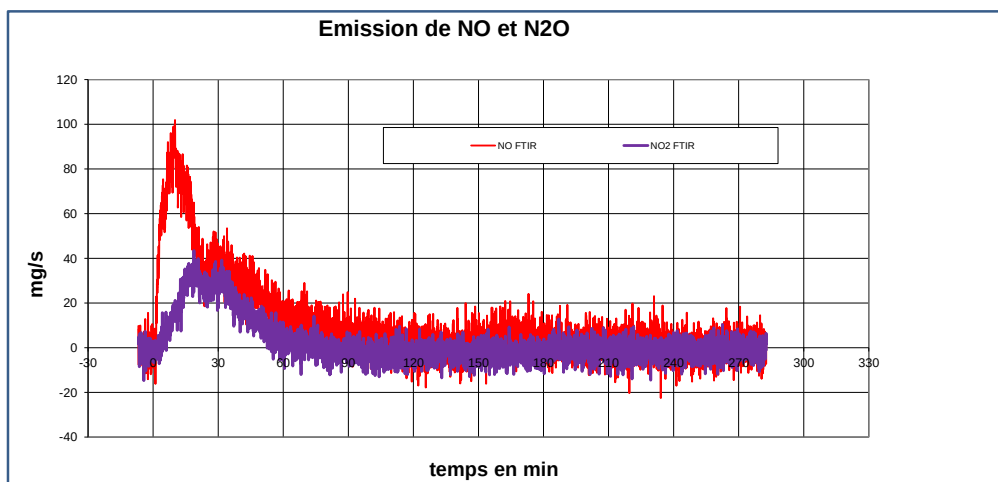
Type de matériaux :	Combustibles solides de récupération	N° CGR: 170785
Date de l'essai	31/05/2018	Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand
Heure de début du prélèvement d'air	11:20	
Heure de fin du prélèvement d'air	16:00	
Durée du prélèvement d'air	04:40	
Poids au début de l'essai (kg)	311	
Poids à la fin de l'essai (kg)	128	
Perte de masse durant l'essai (kg)	183	
Pourcentage de masse perdue	58,8	
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	20000	
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	17000	
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	23000	
Disposition des matériaux et conditions d'allumage	Les CSR furent équitablement placés à l'intérieur de 4 bacs en ferrailes collés. Le premier mesurait 220*50 cm, le second 220*80, le troisième 200*50 et le dernier 202*86. 4 Bruleurs furent allumés pendant une dizaine de minutes pour faire démarrer la combustion.	
Remarques sur la combustion	-	



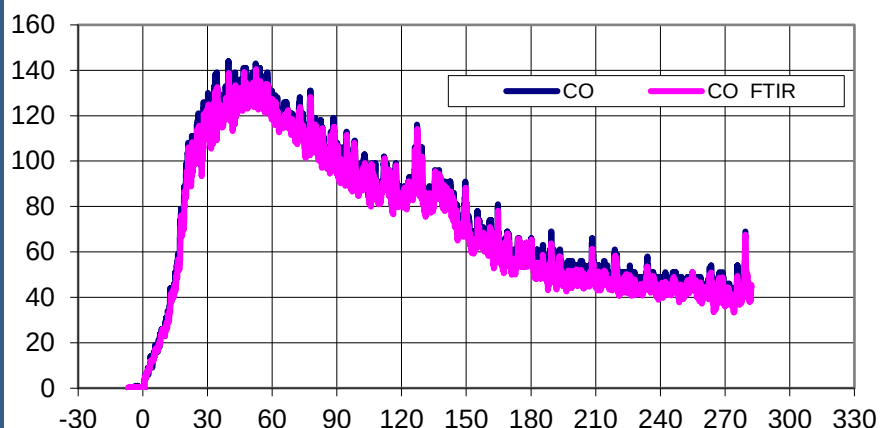
masse des composés émis pendant la combustion									
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	191,0	8,4	nd	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	196,1	8,6	10,4			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)									
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1043,5	45,8	nd	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	1071,8	47,2	56,7						

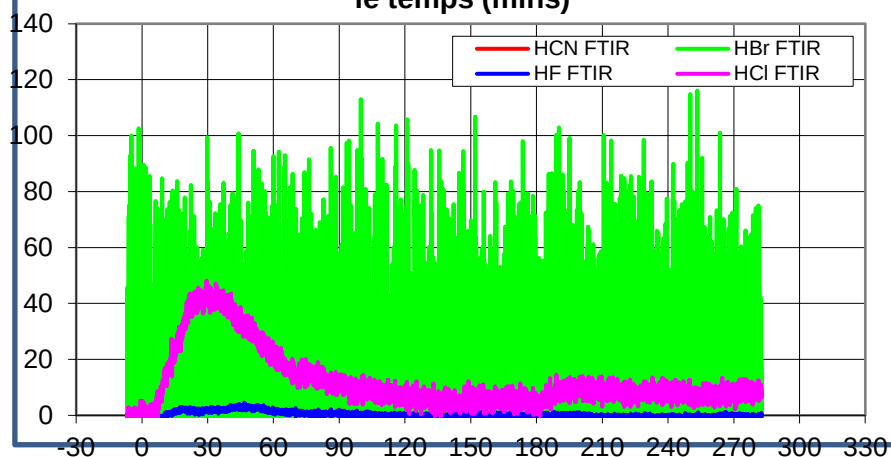
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)									
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	614	27	nd	3	0	0	0	0	0
analyseurs	631	28	33	0	0	nd	nd	nd	nd



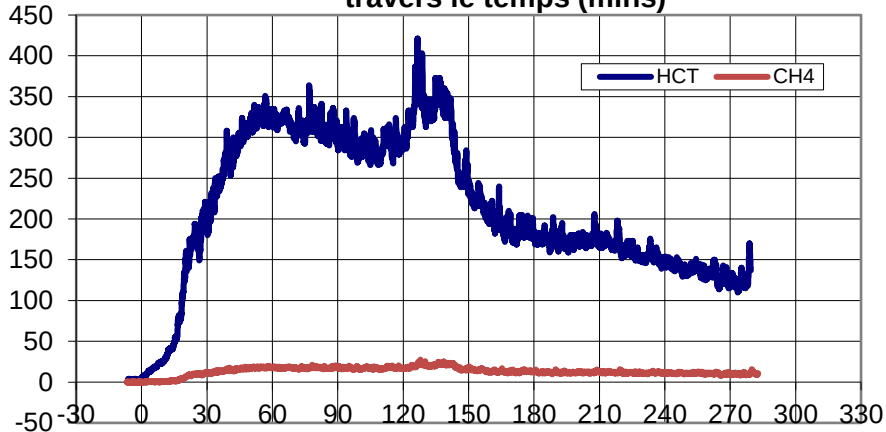
Evolution de la concentration en CO (ppm vol) à travers le temps (min)

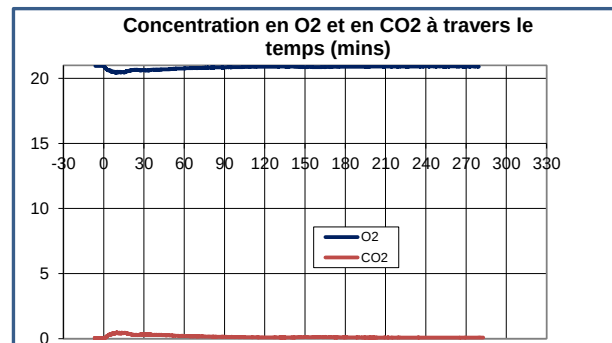
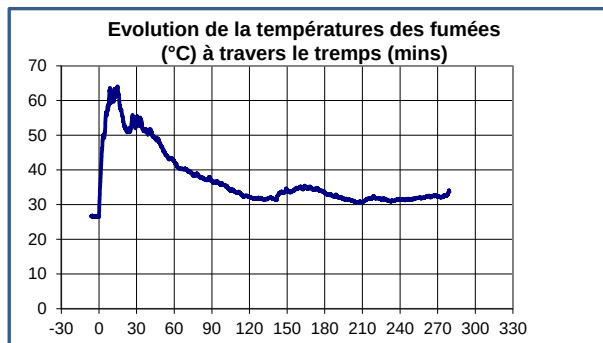


Evolution des émissions d'acides (mg/s) à travers le temps (mins)

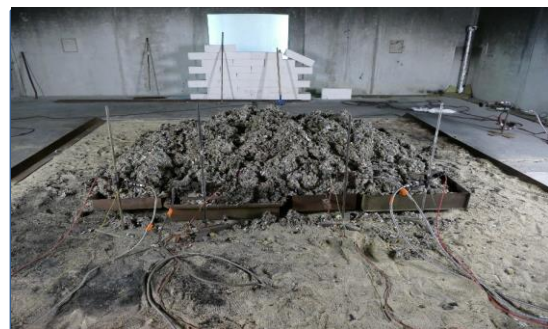
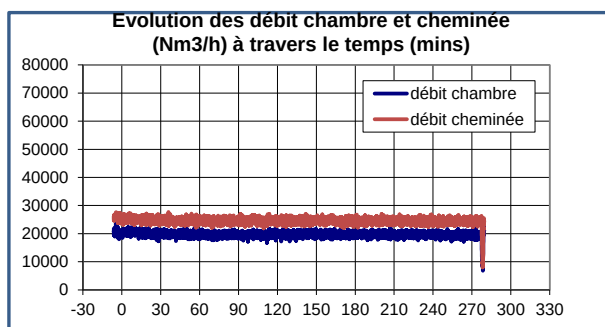


Evolution de la concentration en HCT (ppm/vol) à travers le temps (mins)





Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion

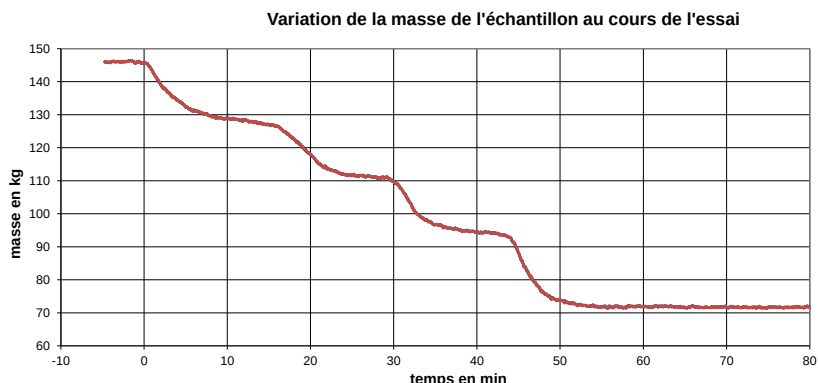


Matériaux après combustion



Essai N°4
INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

Type de matériaux :	Banquettes de voiture	N° CGR:170785
Date de l'essai	12/06/2018	Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand
Heure de début du prélèvement d'air	09:45	
Heure de fin du prélèvement d'air	11:07	
Durée du prélèvement d'air	01:22	
Poids au début de l'essai (kg)	146	
Poids à la fin de l'essai (kg)	72	
Perte de masse durant l'essai (kg)	74,4	
Pourcentage de masse perdue	51,0	
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	30500	
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	28500	
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	32000	

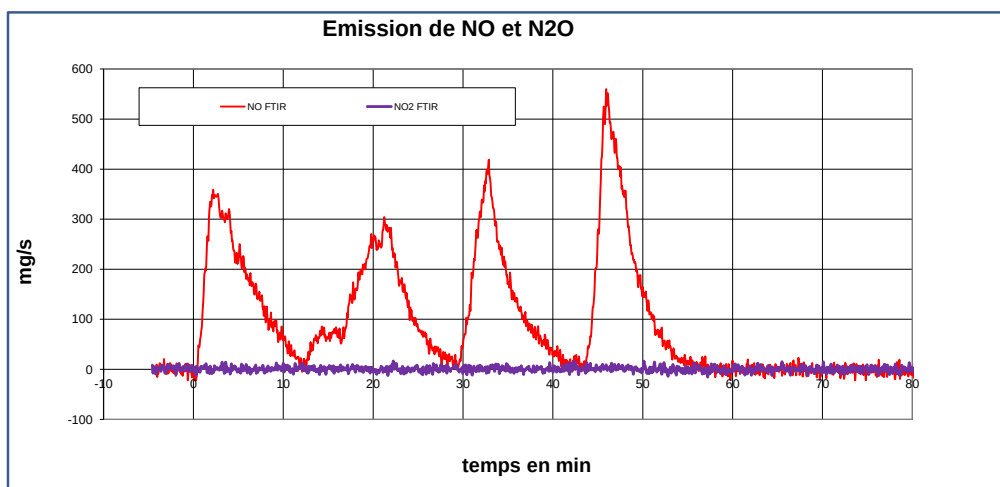


Disposition des matériaux et conditions d'allumage	Les banquettes furent disposées en 4 tas plus ou moins égaux aux 4 coins de la plaque 5*5 m de la galerie. A chaque tas fut alloué un brûleur indépendant. Les tas furent allumés uns à uns avec les brûleurs à gaz (dès qu'un tas commençait à arrêter de brûler, un autre était allumé, cela afin de faire durer le prélèvement le plus longtemps possible).
Remarques sur la combustion	La combustion de banquette étant très rapide, un volume total assez faible d'air fut aspiré durant le prélèvement (du fait de sa courte durée). Le tas 2 fut allumé au bout de 12min15, le tas 3 au bout de 29mins15 et le tas 4 au bout de 43min15.

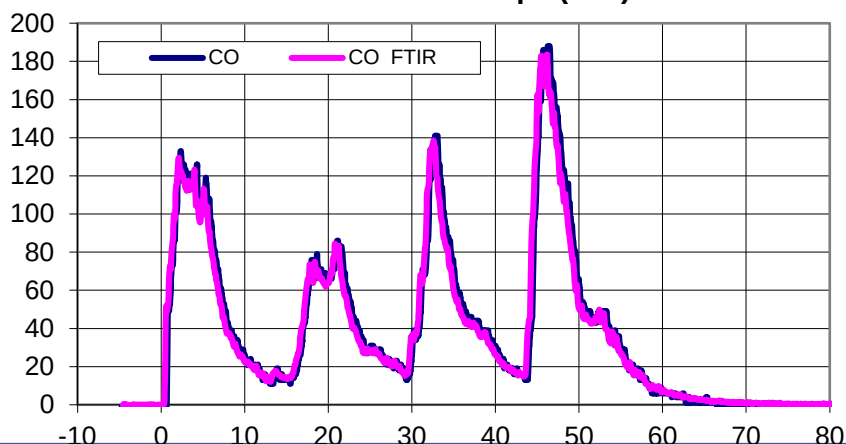
masse des composés émis pendant la combustion									
	CO2	CO	HCl	CH4	NO2	N2O	HCl	HCN	HBr
FTIR	136,0	2,0	nd	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	139,3	2,1	0,4		nd	nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)									
	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1828,6	27,1	nd	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
analyseurs	1871,7	27,8	5,7						

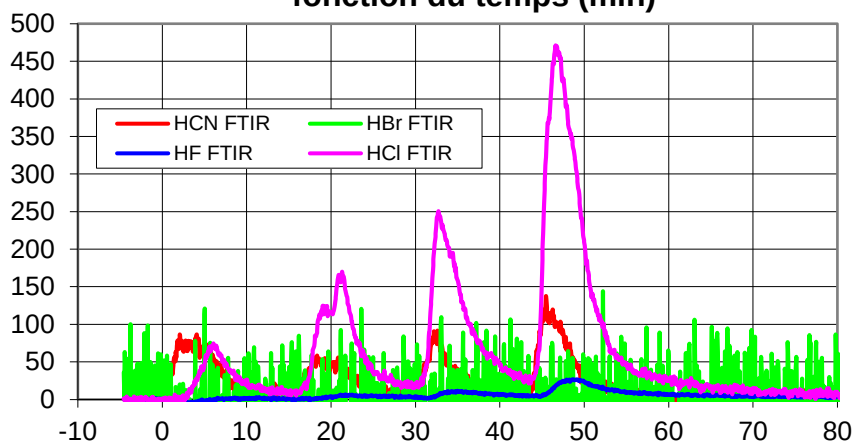
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)									
	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	932	14	nd	0	0	0	0	0	0
analyseurs	954	14	3	0	nd	nd	nd	nd	nd



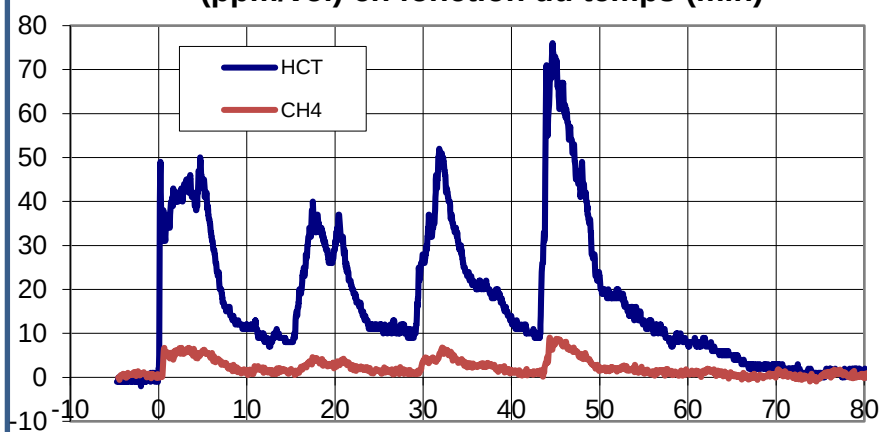
Evolution de la concentration en CO (ppm vol) en fonction du temps (min)

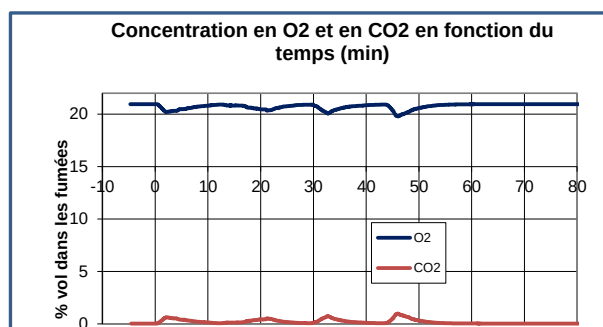
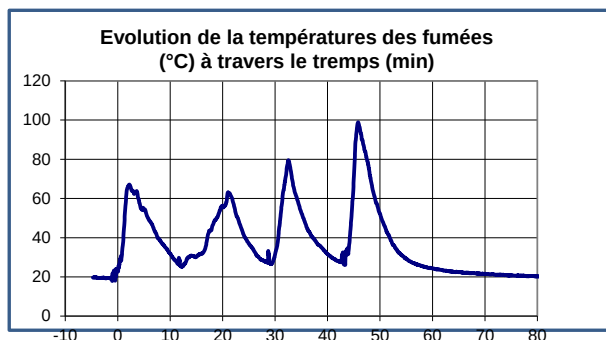


Evolution des émissions d'acides (mg/s) en fonction du temps (min)

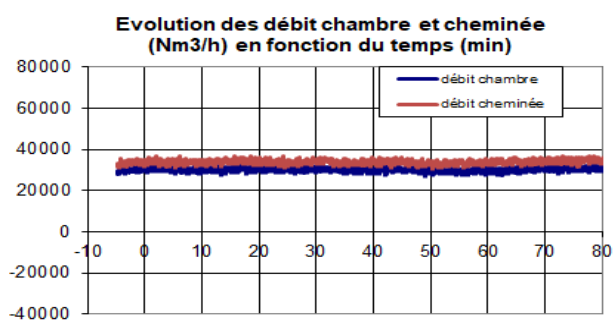


Evolution de la concentration en HCT (ppm/vol) en fonction du temps (min)





Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion



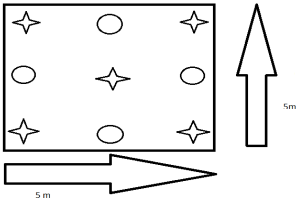
Matériaux après combustion



Essai N°5

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Type de matériaux :	GEM entiers	N° CGR:170785
Date de l'essai	14/06/2018	Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand
Heure de début du prélèvement d'air	10:08	
Heure de fin du prélèvement d'air	11:29	
Durée du prélèvement d'air	01:21	
Poids au début de l'essai (kg)	518	
Poids à la fin de l'essai (kg)	396	
Perte de masse durant l'essai (kg)	122	
Pourcentage de masse perdue	23,6	
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	45500	
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	46500	
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	48500	
Disposition des matériaux et conditions d'allumage	5 frigos + 2 machines à laver + 2 sèche linges furent placés sur la plaque 5*5m comme indiqué sur la figure (les étoiles représentant les frigos et les ronds les machines à laver et sèche linges). 	
Remarques sur la combustion	Les frigos furent allumés un à un au cours de l'essai (dès que la puissance du feu devenait trop faible, un autre était allumé à l'aide d'un bruleur).	

masse des composés émis pendant la combustion

	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	223,6	5,4	nd	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	221,4	5,3	1,9			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

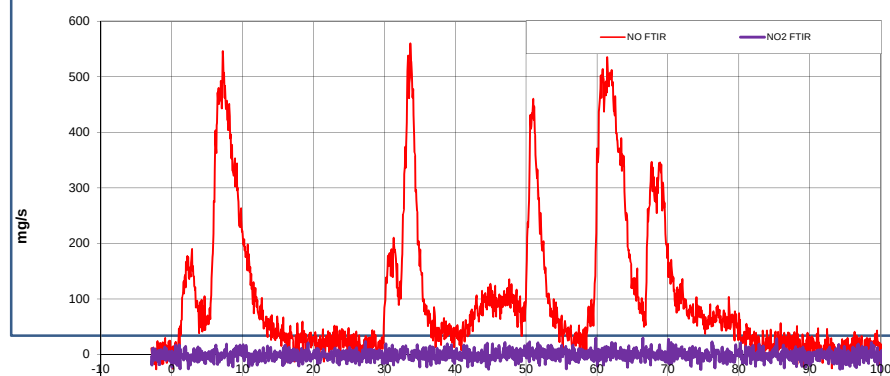
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)

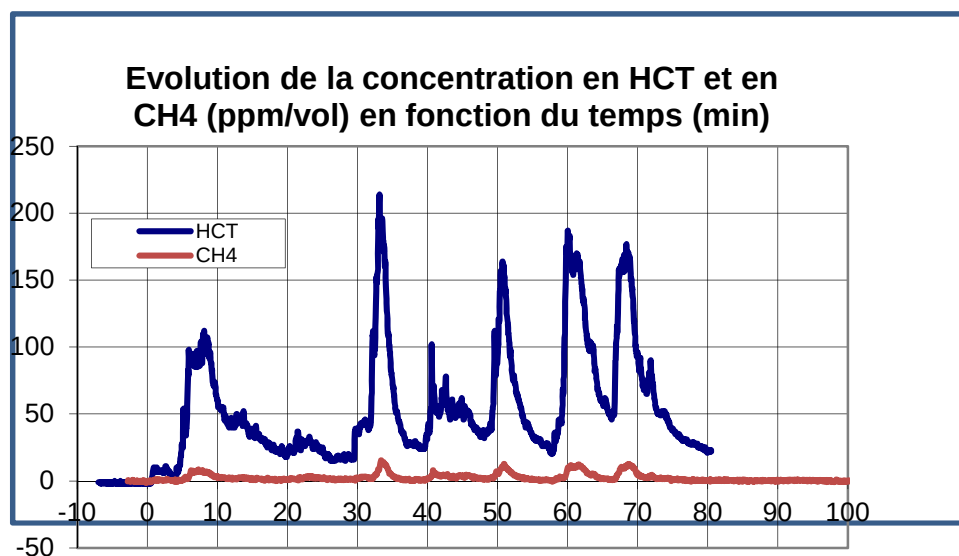
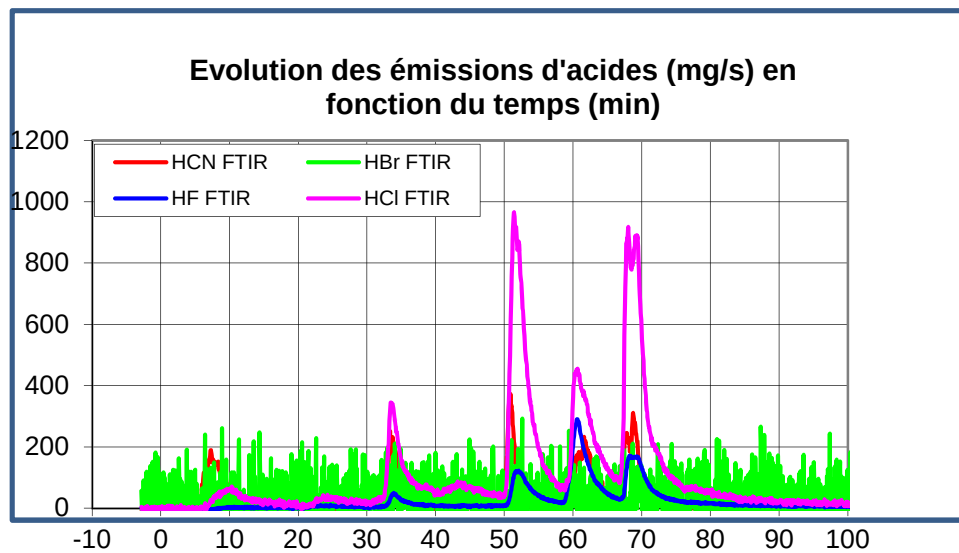
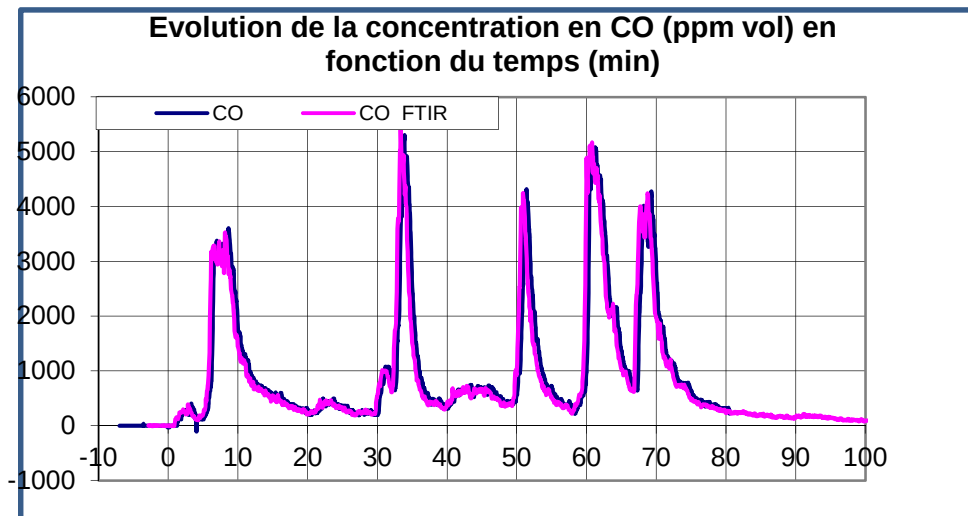
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1832,4	44,2	nd	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	1814,7	43,5	15,6						

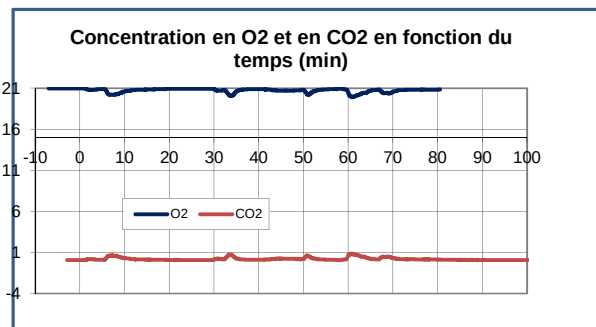
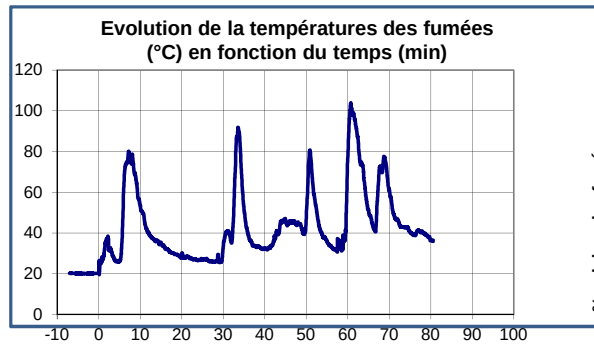
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)

	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	432	10	nd	0	0	0	0	0	0
analyseurs	427	10	4	0	0	nd	nd	nd	nd

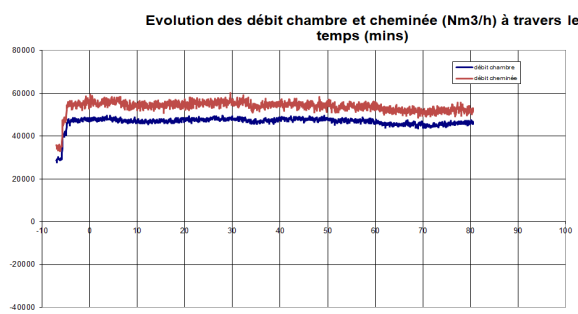
Emission de NO et N2O







Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion



Matériaux après combustion



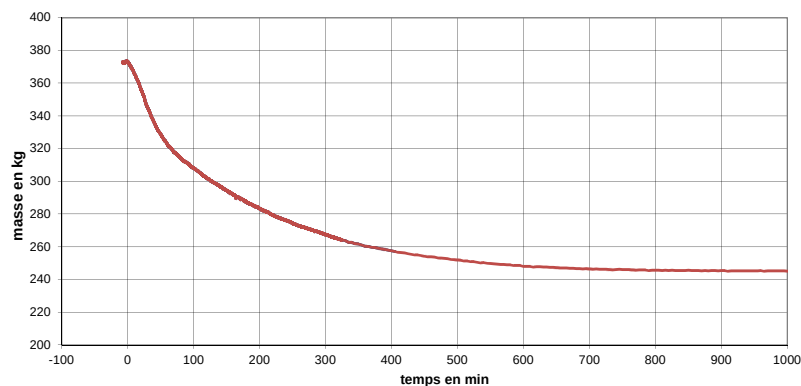
Essai N°6

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Type de matériaux :	GEM broyés	N° CGR:170785
Date de l'essai	18/06/2018	Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand
Heure de début du prélèvement d'air	10:45	
Heure de fin du prélèvement d'air	16:10	
Durée du prélèvement d'air	05:25	
Poids au début de l'essai (kg)	374	
Poids à la fin de l'essai (kg)	246	
Perte de masse durant l'essai (kg)	128	
Pourcentage de masse perdue	34,2	
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	25500	
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	21500	
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	29500	
Disposition des matériaux et conditions d'allumage	Les GEM broyés furent équitablement placés à l'intérieur de 3 bacs en ferralles collés, le premier de 200*50 cm, le second de 220*80, le troisième et le dernier de 200*50. 3 Bruleurs furent allumés pendant une dizaine de minutes pour faire démarrer la combustion.	
Remarques sur la combustion	-	

Variation de la masse de l'échantillon au cours de l'essai



masse des composés émis pendant la combustion

	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	185,1	3,6	nd	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	222,9	4,6	5,7			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

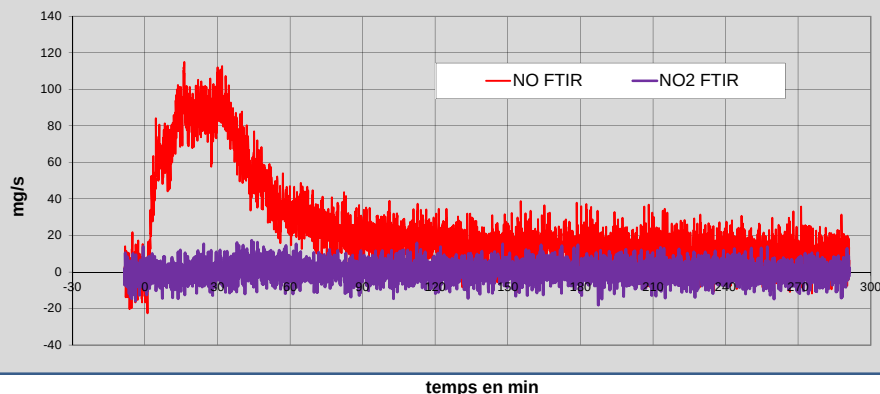
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)

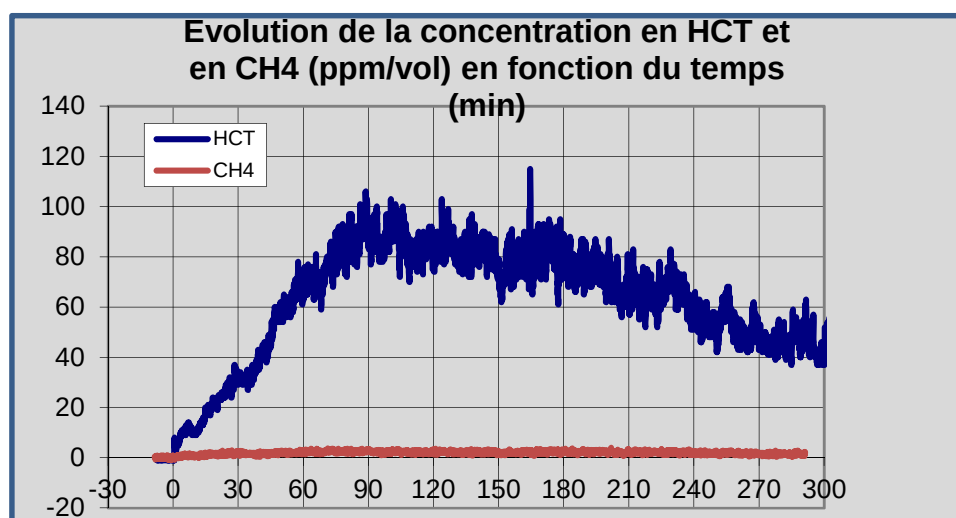
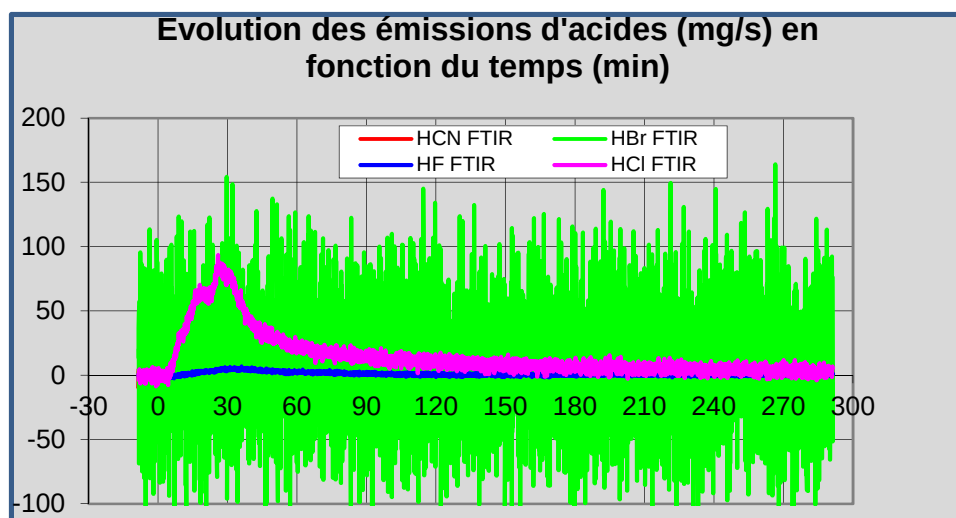
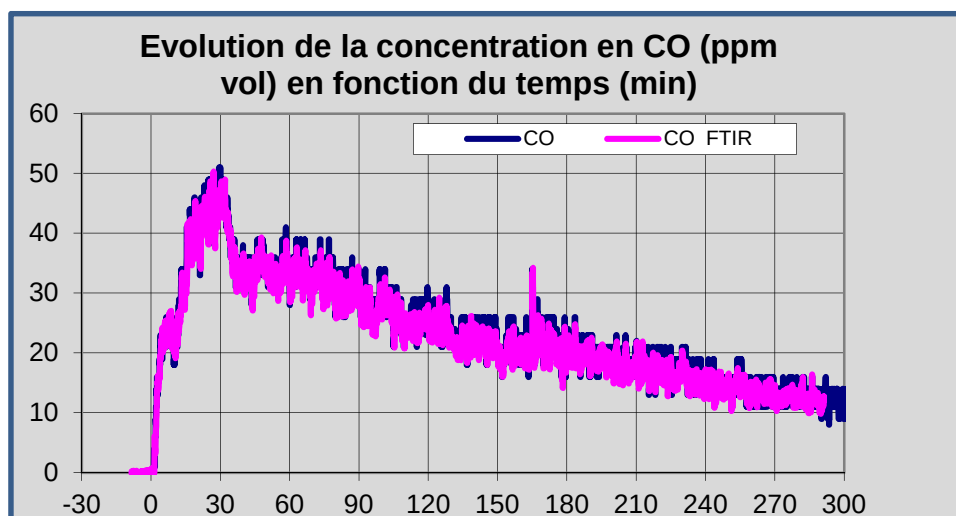
	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1445,8	27,9	nd	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	1741,5	36,3	44,3						

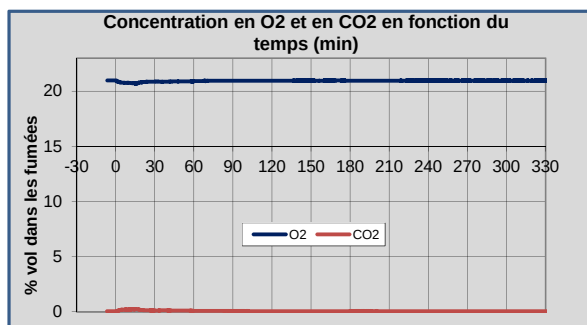
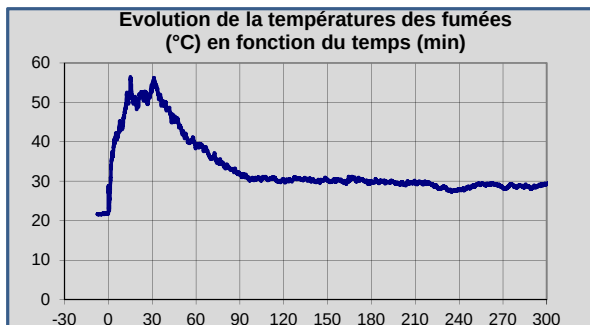
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)

	CO2	CO	HCl	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	495	10	nd	1	0	0	0	0	0
analyseurs	596	12	15	0	0	nd	nd	nd	nd

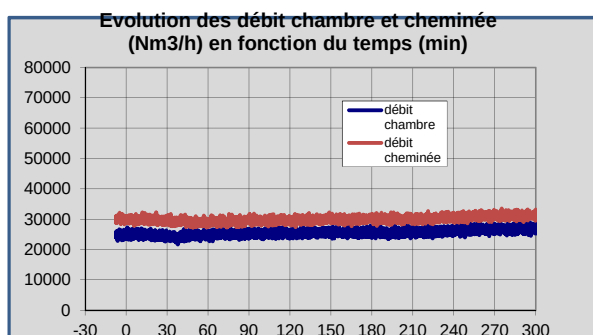
Emission de NO et N2O







Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion



Matériaux après combustion



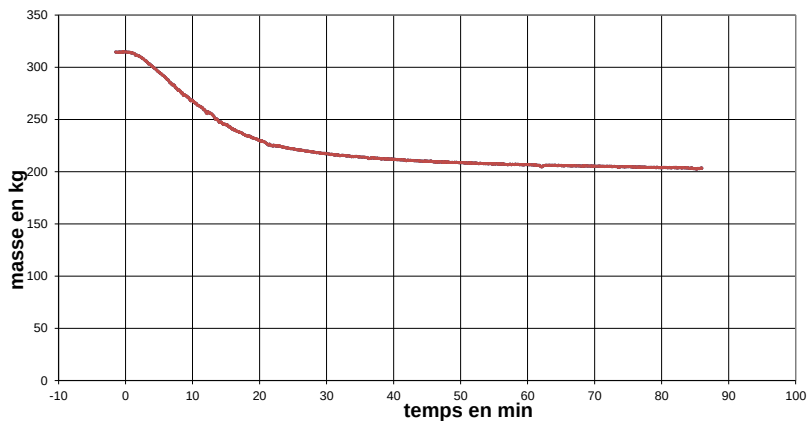
Essai N°7

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Type de matériaux :	Mélange de câbles électriques	N° CGR:170785
Date de l'essai	21/06/2018	Opérateurs présents:
Heure de début du prélèvement d'air	09:49	
Heure de fin du prélèvement d'air	11:15	
Durée du prélèvement d'air	01:26	
Poids au début de l'essai (kg)	314	
Poids à la fin de l'essai (kg)	204	
Perte de masse durant l'essai (kg)	110	
Pourcentage de masse perdue	35,0	
débit moyen des fumées par ventilation(Nm3/h)	39500	
débit min des fumées par ventilation(Nm3/h)	36500	
débit max des fumées par ventilation(Nm3/h)	43500	
Disposition des matériaux et conditions d'allumage	Les câbles électriques furent équitablement placés à l'intérieur de 3 bacs en ferralles collés, le premier de 200*50 cm, le second de 220*80, le troisième et le dernier de 200*50. 3 Bruleurs furent allumés pendant une dizaine de minutes pour faire démarrer la combustion.	
Remarques sur la combustion	-	

Variation de la masse de l'échantillon au cours de l'essai

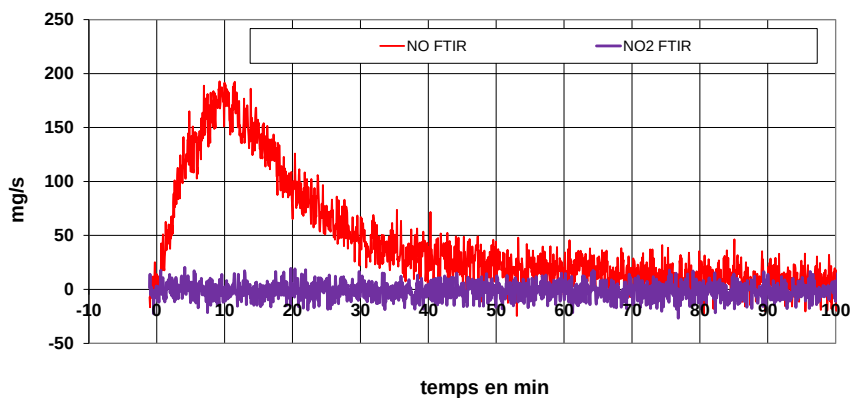


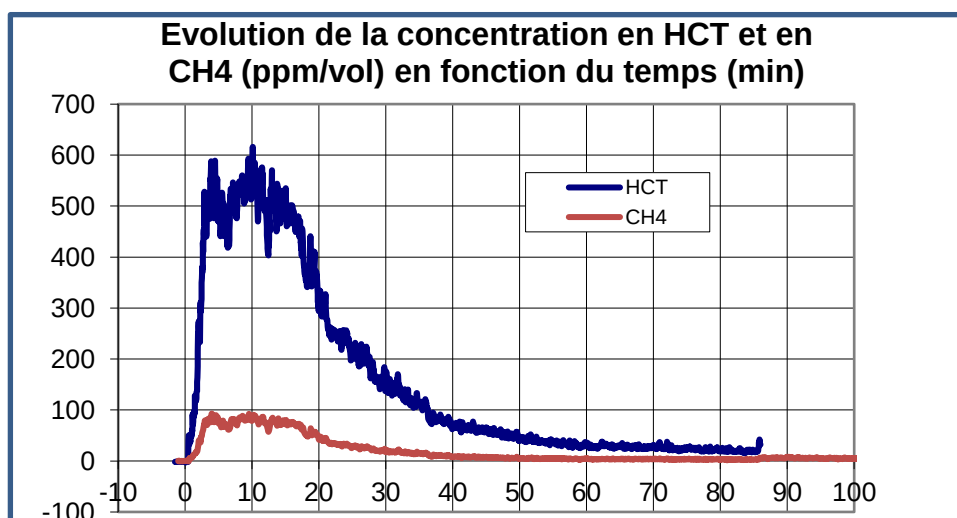
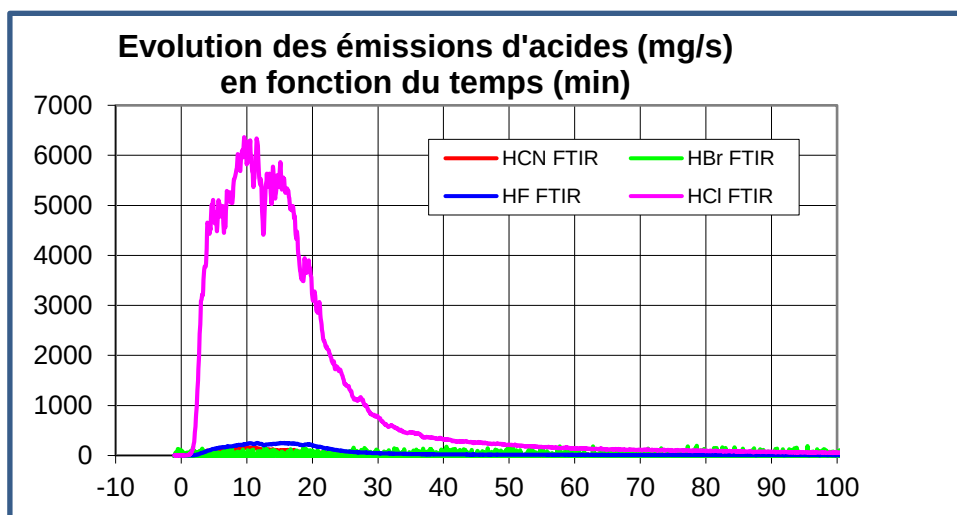
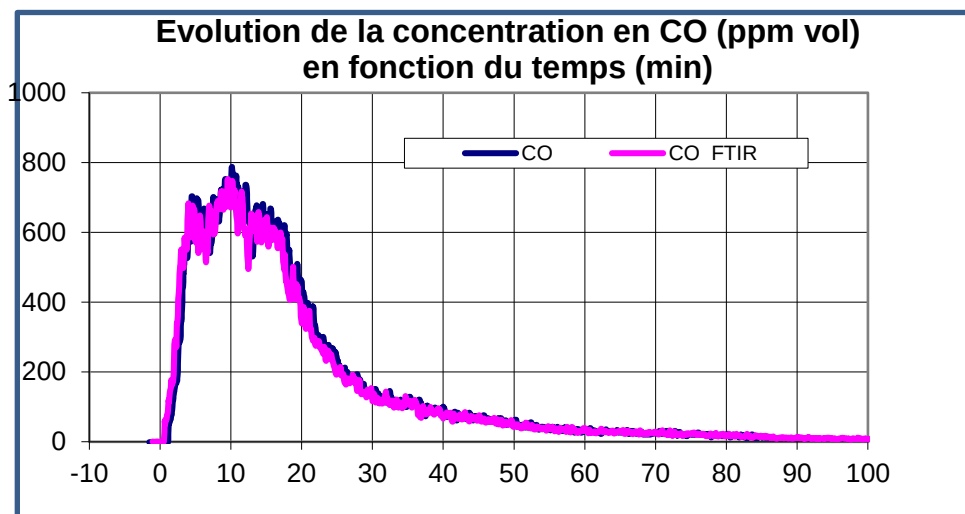
masse des composés émis pendant la combustion									
	CO2	CO	Hct	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	156,3	13,0	nd	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	154,1	13,0	4,8			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

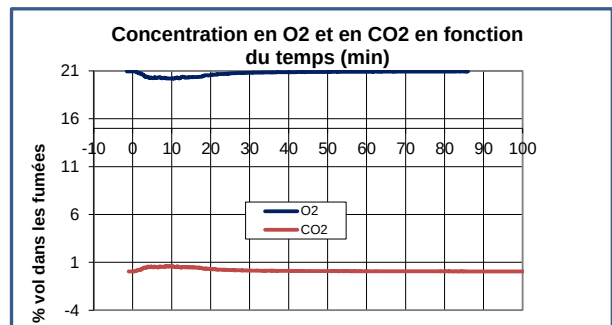
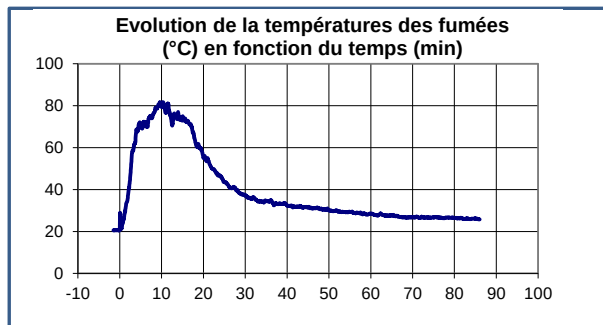
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)									
	CO2	CO	Hct	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1421,3	118,6	nd	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	1401,2	118,2	43,9						

Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)									
	CO2	CO	Hct	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	498	42	nd	3	0	0	0	0	0
analyseurs	491	41	15	0	0	nd	nd	nd	nd

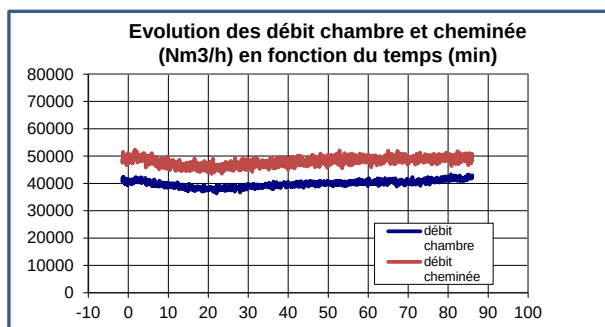
Emission de NO et N2O







Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion



Matériaux après combustion



Essai N°8

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Type de matériaux :	Mélange de câbles électriques	N° CGR:170785
Date de l'essai	25/06/2018	Opérateur présent: Jean Pierre Bertrand

Heure de début du
prélèvement d'air

Heure de fin du
prélèvement d'air

Durée du prélèvement d'air

Poids au début de l'essai
(kg)

Poids à la fin de l'essai
(kg)

Perte de masse durant
l'essai (kg)

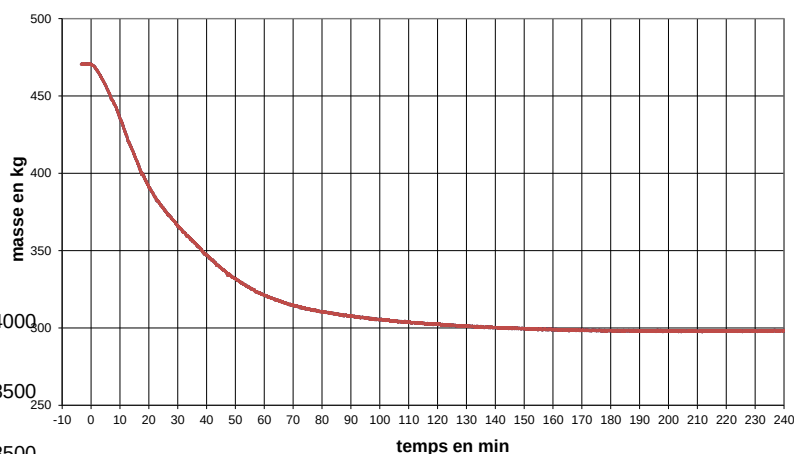
Pourcentage de masse
perdue

débit moyen des fumées
par ventilation(Nm3/h)

débit min des fumées par
ventilation(Nm3/h)

débit max des fumées par
ventilation(Nm3/h)

Variation de la masse de l'échantillon au cours de l'essai



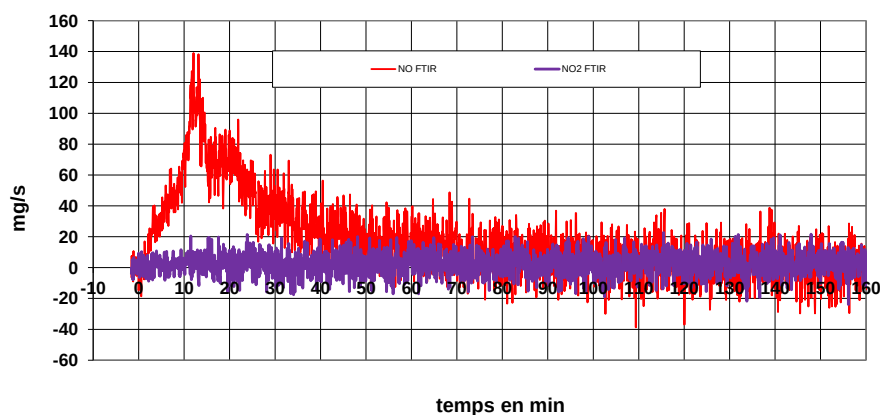
Disposition des matériaux et conditions d'allumage	Les câbles électriques furent équitablement placés à l'intérieur de 3 bacs en ferralles collés, le premier de 200*50 cm, le second de 220*80, le troisième et le dernier de 200*50. 3 Bruleurs furent allumés pendant une dizaine de minutes pour faire démarrer la combustion.								
Remarques sur la combustion	Durant l'essai, l'aspiration trop basse (réglée à 26000 m3/h) posa des problème d'étanchéité au niveau des fumées (qui risquaient de s'échapper de la chambre à cause d'une trop faible aspiration). Les techniciens en charge de l'essai durent donc augmenter le débit de la chambre à 44000 m3/h pour pallier à ce problème.								

masse des composés émis pendant la combustion									
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	227,5	27,5	nd	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	238,0	28,2	11,437873			nd	nd	nd	nd
	siemens	mahiak			Horiba				

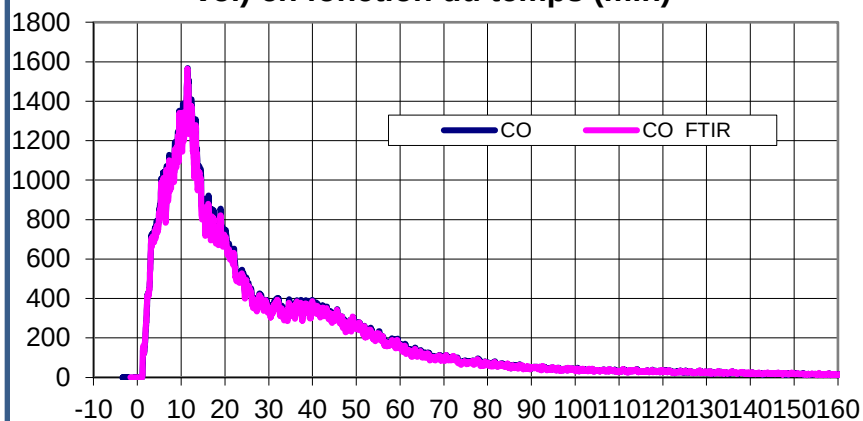
Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse perdue" (g/kg)									
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	1322,5	159,9	nd	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
analyseurs	1384,0	164,1	66,5						

Facteur d'émission : masse des "composés émis" par "masse initiale" (g/kg)									
	CO2	CO	HCt	CH4	NO	NO2	HCl	HCN	HBr
FTIR	484	59	nd	5	0	0	0	0	0
analyseurs	506	60	24	0	0	nd	nd	nd	nd

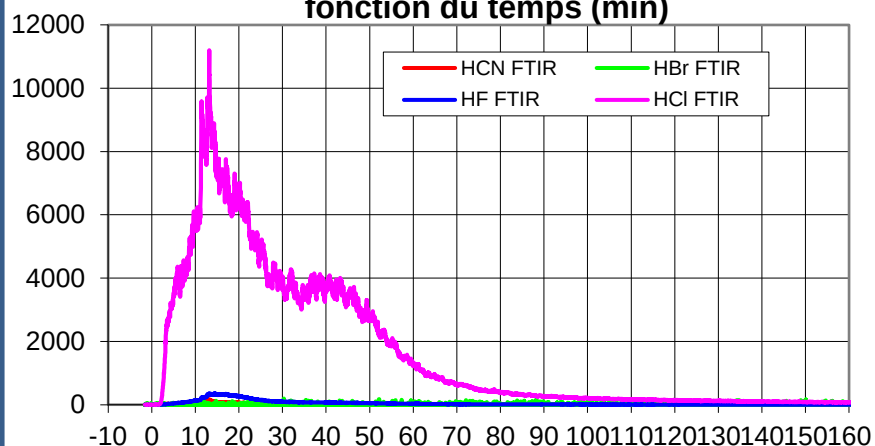
Emission de NO et N2O



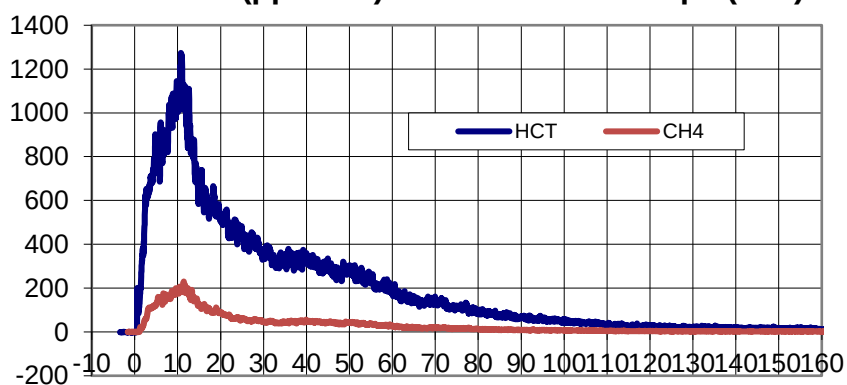
Evolution de la concentration en CO (ppm vol) en fonction du temps (min)

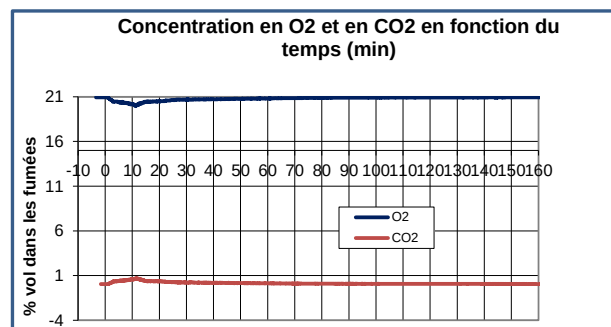
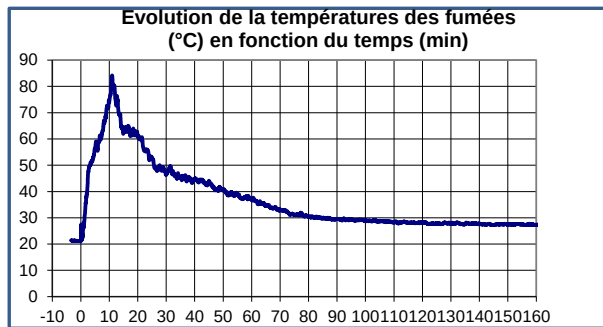


Evolution des émissions d'acides (mg/s) en fonction du temps (min)

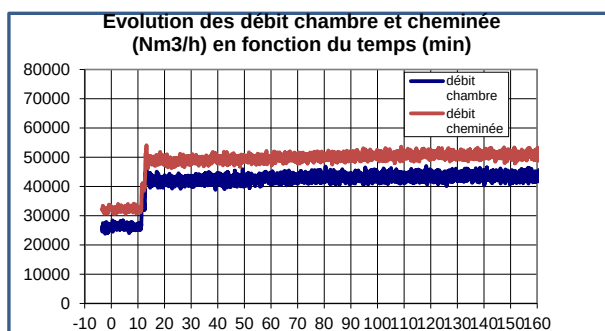


Evolution de la concentration en HCT et en CH4 (ppm/vol) en fonction du temps (min)

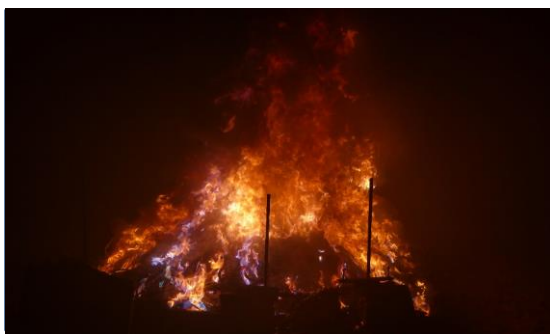




Matériaux avant combustion



Matériaux pendant combustion



Matériaux après combustion



Annexe 3 : résultats (teneurs et facteurs d'émission) par congénère

Essais	Voiture	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Câbles 1	Câbles 2 (1ère heure)	Câbles 2 (suite)
Dioxines									
2,3,7,8 - TétraBDD	102,6	0,0	0,0	138,3	52,7	39,5	6,8	22,3	7,2
1,2,3,7,8 - PentaBDD	39,5	0,0	0,0	37,5	14,8	22,7	0,9	0,0	0,0
1,2,3,4,7,8 - HexaBDD + 1,2,3,6,7,8 Hexa-BDD	0,0	0,0	1,9	5,9	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
1,2,3,7,8,9 - HexaBDD	0,0	0,0	2,7	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaBDD	0,5	0,0	1,5	3,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,5
Octa-BDD	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Somme dioxines	142,5	0,0	6,1	189,5	67,5	62,7	7,7	22,3	7,8
Furanes									
2,3,7,8 - TétraBDF	157,7	221,3	318,5	67,1	48,1	19,9	4,2	13,8	4,5
2,4,6,8 - TétraBDF	1151,6	283,1	5095,7	254,5	244,2	224,7	41,5	139,4	75,7
1,2,3,7,8 - PentaBDF	55,7	0,2	0,2	13,9	7,9	11,9	0,2	0,6	0,2
2,3,4,7,8 - PentaBDF	283,6	2459,1	689,3	319,8	141,9	31,5	7,3	22,8	20,0
1,2,3,4,7,8 - HexaBDF	458,0	312,3	588,3	385,5	104,7	66,9	6,6	16,0	18,4
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaBDF	77,0	72,0	143,2	89,5	33,6	25,2	7,2	38,3	31,7
Octachlorodibenzofurane Octa-BDF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Somme furanes	2183,6	3348,0	6835,2	1130,4	580,4	380,2	66,9	230,9	150,6
Teneurs (en pg I.TEQ /m³)	2326,1	3348,0	6841,3	1319,9	647,9	442,9	74,7	253,2	158,4

Teneurs en PBDD-DF (en pg I.TEQ/m³)

Essais	Voiture	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Câbles 1	Câbles 2 (1ère heure)	Câbles 2 (suite)
Dioxines									
2,3,7,8 - TétraCDD	19,20	519,9	353,8	14,4	1,9	344,1	201,5	736,3	24,4
1,2,3,7,8 - PentaCDD	12,08	518,4	307,6	16,3	3,3	695,2	370,6	3334,3	80,4
1,2,3,4,7,8 - HexaCDD	2,52	100,2	42,1	2,6	0,5	135,1	86,5	398,8	12,6
1,2,3,6,7,8 - HexaCDD	3,30	248,8	118,8	8,2	1,1	301,4	453,4	1790,0	63,7
1,2,3,7,8,9 - HexaCDD	3,27	190,5	94,2	6,3	0,8	224,6	285,1	1160,1	31,4
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaCDD	1,27	96,7	57,2	2,7	0,5	125,3	321,5	1529,7	43,6
Octa-CDD	0,13	7,6	6,9	0,2	0,1	9,8	57,3	234,1	13,4
Somme dioxines	41,77	1682,1	980,5	50,8	8,1	1835,5	1776,0	9183,3	269,4
Furanes									
2,3,7,8 - TétraCDF	38,1	144,6	109,4	6,6	2,9	286,9	351,0	1565,6	81,0
1,2,3,7,8 - PentaCDF	11,5	74,7	20,3	3,1	1,3	137,0	164,1	1111,0	58,0
2,3,4,7,8 - PentaCDF	278,2	1785,3	648,2	69,5	26,2	3480,2	5604,6	28462,6	1647,5
1,2,3,4,7,8 - HexaCDF	37,5	432,9	115,8	11,3	4,8	943,9	1344,9	8452,2	366,2
1,2,3,6,7,8 - HexaCDF	37,9	418,9	119,6	11,5	4,3	732,2	1112,4	6139,2	297,5
2,3,4,6,7,8 - HexaCDF	43,1	610,5	171,8	20,9	6,1	748,4	3327,0	14877,4	921,3
1,2,3,7,8,9 - HexaCDF	7,0	65,6	27,8	4,8	2,4	137,3	507,9	4079,7	302,0
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaCDF	9,1	134,1	35,1	4,2	1,8	235,7	477,8	1788,8	245,4
1,2,3,4,7,8,9 - HeptaCDF	2,2	18,0	4,6	0,6	0,4	40,0	306,5	1163,9	44,9
Octa-CDF	0,6	2,7	1,1	0,1	0,1	7,4	56,6	208,6	23,7
Somme furanes	465,2	3687,2	1253,7	132,7	50,3	6749,0	13252,7	67849,2	3987,4
Teneur (en pg I.TEQ /m³)	506,9	5369,3	2234,2	183,5	58,4	8584,5	15028,7	77032,5	4256,8

Teneurs en PCDD-DF (en pg I.TEQ/m³)

Facteurs d'émission (en ng I.TEQ /kg perdu)	Voiture	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Câbles 1	Câbles 2 (1ère heure)	Câbles 2 (suite)
Dioxines									
2,3,7,8 - TétraBDD	79,9	0,0	0,0	77,0	27,2	42,3	3,5	5,7	37,7
1,2,3,7,8 - PentaBDD	30,7	0,0	0,0	20,9	7,6	24,3	0,5	0,0	0,0
1,2,3,4,7,8 - HexaBDD + 1,2,3,6,7,8 Hexa-BDD	0,0	0,0	1,0	3,3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
1,2,3,7,8,9 - HexaBDD	0,0	0,0	1,4	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaBDD	0,4	0,0	0,8	1,8	0,1	0,2	0,0	0,0	2,6
Octa-BDD	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
Somme dioxines	111,0	0,0	3,1	105,5	34,9	67,2	4,0	5,7	40,7
Furanes									
2,3,7,8 - TétraBDF	122,8	286,8	160,4	37,4	24,9	21,3	2,2	3,5	23,3
2,4,6,8 - TétraBDF	896,7	366,9	2566,4	141,7	126,2	240,6	21,6	35,4	393,3
1,2,3,7,8 - PentaBDF	43,4	0,7	0,1	7,8	4,1	12,8	0,1	0,1	1,0
2,3,4,7,8 - PentaBDF	220,8	3187,1	347,2	178,0	73,3	33,7	3,8	5,8	104,0
1,2,3,4,7,8 - HexaBDF	356,7	404,8	296,3	214,6	54,1	71,6	3,4	4,1	95,8
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaBDF	59,9	93,3	72,1	49,8	17,4	27,0	3,7	9,7	164,9
Octachlorodibenzofurane Octa-BDF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Somme furanes	1700,3	4339,6	3442,5	629,2	299,9	407,0	34,8	58,6	782,4
Facteurs d'émission (en ng I.TEQ /kg perdu)	1811,3	4339,6	3445,6	734,6	334,8	474,2	38,8	64,3	823,1

Facteurs d'émission en PBDD-DF (en ng I.TEQ/kg perdu)

Essais	Voiture	CSR 1	CSR 2	Banquettes	GEM entiers	GEM broyés	Câbles 1	Câbles 2 (1 ^{ère} heure)	Câbles 2 (suite)
Dioxines									
2,3,7,8 - TétraCDD	15,0	673,8	178,2	8,0	1,0	368,5	104,8	187,0	126,6
1,2,3,7,8 - PentaCDD	9,4	671,8	154,9	9,1	1,7	744,3	192,7	846,9	417,7
1,2,3,4,7,8 - HexaCDD	2,0	129,8	21,2	1,4	0,2	144,7	45,0	101,3	65,6
1,2,3,6,7,8 - HexaCDD	2,6	322,5	59,8	4,6	0,6	322,7	235,7	454,7	330,8
1,2,3,7,8,9 - HexaCDD	2,5	247,0	47,4	3,5	0,4	240,5	148,3	294,7	163,4
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaCDD	1,0	125,3	28,8	1,5	0,3	134,1	167,2	388,5	226,3
Octa-CDD	0,3	9,9	3,5	0,5	0,0	10,5	29,8	59,5	69,6
Somme	32,7	2180,1	493,8	28,6	4,2	1965,2	923,4	2332,5	1400,0
Furanes									
2,3,7,8 - TétraCDF	29,7	187,3	55,1	3,7	1,5	307,2	182,5	397,7	421,0
1,2,3,7,8 - PentaCDF	9,0	96,9	10,2	1,7	0,7	146,7	85,3	282,2	301,5
2,3,4,7,8 - PentaCDF	216,6	2313,9	326,5	38,7	13,5	3726,1	2913,9	7229,5	8560,2
1,2,3,4,7,8 - HexaCDF	29,2	561,0	58,3	6,3	2,5	1010,6	699,2	2146,9	1903,0
1,2,3,6,7,8 - HexaCDF	29,5	542,9	60,2	6,4	2,2	783,9	578,3	1559,4	1545,6
2,3,4,6,7,8 - HexaCDF	33,6	791,2	86,5	11,6	3,2	801,2	1729,7	3778,9	4786,9
1,2,3,7,8,9 - HexaCDF	5,5	85,0	14,0	2,7	1,2	147,0	264,1	1036,3	1569,0
1,2,3,4,6,7,8 - HeptaCDF	7,1	173,8	17,7	2,4	0,9	252,4	248,4	454,4	1274,8
1,2,3,4,7,8,9 - HeptaCDF	1,7	23,3	2,3	0,3	0,2	42,8	159,3	295,6	233,1
Octa-CDF	0,5	3,5	0,6	0,1	0,1	7,9	29,4	53,0	123,2
Somme	362,2	4778,7	631,4	73,9	26,0	7225,8	6890,2	17233,7	20718,3
FE (en ng I.TEQ / kg perdu)	394,9	6958,9	1125,2	102,5	30,2	9190,9	7813,6	19566,2	22118,3

Facteurs d'émission en PCDD-DF (en ng I.TEQ/kg perdu)

