



Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de forêt et de décharge

Pollutants emission factors from simulated forest and landfill fires

Rapport **final - confidentialité : non**

ADEME

(convention n°03-74-008 notifiée le 02 juin 2003 pour
une durée de 15 mois, suivi technique : E. FIANI)

*Serge COLLET
tél 03 44 55 64 58
INERIS
Unité Qualité de l'Air
BP 2 - 60550 Verneuil en Halatte*

Novembre 2004

Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de forêt et de décharge

Pollutants emission factors from simulated forest and landfill fires

Rapport **final** - confidentialité : non

ADEME

(convention n°03-74-008 notifiée le 02 juin 2003 pour une durée de 15 mois, suivi technique : E. FIANI)

Novembre 2004

PERSONNES AYANT PARTICIPE A L'ETUDE :

M. DEBEAUPUIS - S. COLLET

Ce document comporte 16 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Serge COLLET	Jean POULLEAU	Rémi PERRET
Qualité	Ingénieur Unité « Qualité de l'air »	Ingénieur Unité « Qualité de l'air »	Responsable de l'Unité « Qualité de l'air »
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. RÉSUMÉ	3
2. MOTS CLÉS	3
3. GLOSSAIRE	3
4. OBJECTIFS	4
5. CONTEXTE	4
6. DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE	4
6.1 Prise des échantillons	5
6.2 Réalisation des essais	5
7. RÉSULTATS	8
7.1 Validation des résultats	8
7.2 Résultats obtenus	8
7.3 Incertitudes associées aux résultats.....	9
8. COMMENTAIRES	9
8.1 Commentaires sur les résultats	9
8.2 Répartition entre les différentes familles chimiques.....	13
8.3 Comparaison avec des données de la littérature.....	14
8.4 Estimation des émissions françaises	15
9. LISTE DES ANNEXES	16

1. RESUME

Des facteurs d'émission de polluants (CO, COVT, SO₂, NO_x, HCL, HAP, PCB, PCDD/DF) liés à la combustion de la biomasse en forêt et de déchets (OM et DIB) en centre d'enfouissement technique (CET) ont été déterminés. Cinq essais ont été effectués avec des échantillons de biomasse provenant des Landes et des Bouches du Rhône. Ceux-ci ont été prélevés à 10 et 50 km de la côte, l'un d'entre eux a été arrosé avec de l'eau de mer puis séché, afin d'étudier l'influence de la forte teneur en chlore des végétaux côtiers et l'extinction des feux de forêt par aspersion d'eau de mer sur les émissions de dioxines et furanes. Deux essais ont également été effectués avec des déchets récupérés en CET. Les brûlages ont été réalisés à l'intérieur d'une enceinte fermée de 80 m³ équipée d'une hotte d'extraction des fumées. Les facteurs d'émission de dioxines et furanes déterminés s'élèvent en moyenne à 10,5 ng I.TEQ/kg de biomasse brûlée (fourchette : 1,0 à 25,9) et à 237 ng I.TEQ/kg de déchets brûlés (fourchette : 233 et 242). La teneur en chlore des végétaux côtiers n'influe pas de façon significative sur les émissions de dioxines et furanes. En revanche, l'humidité des végétaux pourrait jouer un rôle majeur sur les émissions de polluants.

2. MOTS CLES

Facteurs d'émission, polluants, dioxines et furanes, hydrocarbures aromatiques polycycliques, feux de forêt, feux de décharge.

3. GLOSSAIRE

Polluants :

- CO : monoxyde de carbone
- CO₂ : dioxyde de carbone
- SO₂, dioxyde de soufre
- NO_x : oxydes d'azote (NO + NO₂)
- COVT : composés organiques volatils totaux
- HCl : acide chlorhydrique
- HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques
- PCB : polychloro-biphenyles
- PCDD/DF : dioxines et furanes
- I.TEQ : équivalent toxique

Autres termes techniques :

- CET : centre d'enfouissement technique
- OM : ordures ménagères
- DIB : déchet industriel banal

4. OBJECTIFS

L'objectif de cette étude est d'améliorer la connaissance des facteurs d'émission de polluants liés à la combustion à l'air libre de la biomasse et de déchets de centre d'enfouissement technique en simulant ces feux dans une chambre de combustion.

5. CONTEXTE

Durant la période 1980 - 2000, 5218 feux de forêt par an ont été dénombrés en moyenne, représentant une surface de 30738 hectares (source : Ministère de l'Intérieur). Bien que ces chiffres tendent à diminuer sur la dernière décennie (23024 hectares brûlés en moyenne par an), les émissions de polluants liés à ces phénomènes saisonniers pourraient être importantes. Ces émissions méconnues ne sont actuellement pas comptabilisés dans les inventaires nationaux.

Lors de la combustion de la biomasse dans des conditions non maîtrisées, de nombreux polluants sont susceptibles de se former : les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils (COV), les dioxines et furanes, etc. L'estimation de ces émissions est à l'heure actuelle assortie d'une incertitude importante du fait du manque d'études réalisées sur ce sujet. Pour les dioxines et furanes, quelques études ont mis en évidence des teneurs élevées¹ (20 pg/m³) dans l'air à proximité de feux de forêts et des facteurs d'émission importants lors d'essais de feux de forêts simulés² (de l'ordre de 20 ng/kg de biomasse brûlée).

Pour les dioxines et furanes, la présence de composés inorganiques chlorés tels que NaCl pourrait jouer également un rôle sur les émissions mais n'est pas indispensable à la formation de ces polluants qui dépend notamment des conditions particulières de combustion.

Les polluants émis par les feux de décharges sont tout aussi mal connus que ceux émis par les feux de forêts. Ces feux accidentels sont encore un phénomène saisonnier relativement courant notamment dans le sud de la France. Du fait de l'extrême diversité des déchets mis en centre d'enfouissement technique (CET), ces feux sont également susceptibles d'émettre des dioxines et furanes.

6. DEROULEMENT DE L'ETUDE

Le programme de travail est découpé en deux phases :

- prise des échantillons,
- et réalisation des essais.

¹ Forest fires as a source of PCDD and PCDF, Clement and Tashiro, 11th International Symposium on Chlorinated dioxins and related compounds, 1991

² PCDD/F emissions from forest fire simulations, Gullett and Touati, Atmospheric Environment - Volume 37, février 2003, p. 803-813 - Résultats provisoires présentés lors du 22nd International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and POPs, 2002

6.1 PRISE DES ECHANTILLONS

Pour la simulation des feux de forêts, des échantillons ont été récupérés durant la seconde quinzaine du mois d'août 2003, période de l'année la plus sèche pour les végétaux, dans le sud-est (Bouches du Rhône) et dans le sud-ouest (forêt des Landes), les principaux foyers d'incendie étant situés dans ces deux zones géographiques.

Des échantillons ont été prélevés à 10 et 50 kilomètres de la côte afin d'appréhender l'influence des embruns sur les émissions de dioxines et furanes.

En ce qui concerne le sud-ouest, des échantillons ont été prélevés sur trois sites avec le concours des agents de l'Office National des Forêts : dans l'arrière pays en landes humides à Moline et Brande, en landes sèches à Callune et en milieu côtier sur le littoral à Seignosse. Les échantillons récupérés sont constitués de litière, de mousses, de bruyères, de fougères, d'aiguilles de conifères, de pommes de pin, d'arbustes (genêts), d'écorces et de branchages de pin et chêne de faible diamètre (3 à 4 cm maximum) : en effet, lors des incendies de forêts, seule l'écorce, voire les premiers centimètres des grosses branches et des troncs sont brûlés.

En ce qui concerne le sud-est, les échantillons ont été récupérés sur deux sites : en milieu côtier avec le concours de la commune de La Ciotat et dans l'arrière pays dans le massif de Sainte Victoire avec la collaboration du syndicat mixte « Grand Site Sainte Victoire ». Les échantillons récupérés sont constitués de litière, de mousses, d'herbes, de bruyères, de romarin, de feuilles de chêne, d'aiguilles de conifères, d'ajoncs, d'écorces, de ciste blanc et de branchages de faible diamètre (3 à 4 cm maximum) de diverses essences (chêne vert et kermès, pin).

Les échantillons recueillis correspondent approximativement à une surface débroussaillée de 4 m² environ.

Pour la simulation des feux de décharge, les échantillons ont été directement prélevés sur deux Centres d'Enfouissement Technique situés sur la commune d'Aiguillon et sélectionnés avec le concours de l'ADEME Aquitaine. Des ordures ménagères (OM) et des déchets industriels banaux (DIB) comprenant diverses matières plastiques, du bois, du caoutchouc, des chiffons, etc., ont été récupérés. Seule la partie superficielle du sol est récupérée, soit les 15 premiers centimètres environ. Les échantillons recueillis correspondent à une surface de 2 m² environ.

L'ensemble des échantillons a été conservé au frais dans des sacs étanches afin de limiter l'évaporation de l'eau.

6.2 REALISATION DES ESSAIS

6.2.1 Description de l'installation

Les essais ont été effectués dans une chambre de 80 m³ permettant d'effectuer des brûlages d'échantillons de plusieurs kilogrammes. Cette chambre est équipée d'une hotte d'extraction des fumées positionnée au-dessus de la zone de combustion. Un débit d'extraction des fumées de 1800 nm³/h, correspondant à un taux de renouvellement horaire d'air du local de 22,5, a été retenu lors de la réalisation des essais afin de simuler un feu relativement ventilé représentatif des conditions naturelles de brûlage. L'air de combustion est introduit par la porte de la chambre. L'avancement de la combustion est surveillé visuellement par des hublots positionnés de chaque côté de la chambre.

Les échantillons prélevés sur site sont déposés dans un bac métallique circulaire dont le fond est recouvert de terre ou de sable prélevé sur site. Le bac a un diamètre de 80 cm et est muni sur son pourtour d'un rebord sur une hauteur de 5 cm et d'une grille sur une hauteur de 10 cm supplémentaire afin de maintenir l'échantillon en place durant l'essai. Il est positionné sur une balance de précision permettant de suivre en continu le poids de l'ensemble bac + échantillon.

Les fumées de combustion issues de la chambre passent à travers un dispositif de lavage des gaz avant rejet à l'atmosphère. Les prélèvements de polluants ont été effectués avant le laveur sur une portion droite et horizontale de la gaine d'extraction des fumées conforme à la norme française X 44-052.

6.2.2 Biomasse utilisée lors des essais :

Essais	1	2	3	4
Végétation basse (% massique)	45.1	46.3	33.0	38.0
Végétation haute (% massique)	54.9	53.7	67.0	62.0

La végétation basse comprend la litière, les aiguilles de conifères et les pommes de pin tombées au sol, la mousse, la bruyère, les fougères et les genêts pour les échantillons récupérés dans les Landes et la litière, les aiguilles de conifères, les feuilles de chêne et les pommes de pin tombées au sol, la mousse, les herbes, la bruyère, le romarin et les cistes pour les échantillons récupérés dans les Bouches du Rhône.

La végétation haute comprend les écorces d'arbres récupérés et les branchages de faible diamètre (< 4 cm) de pins et chênes avec leur feuillage.

6.2.3 Blanc de l'installation avant les essais

Des essais de brûlage de divers matériaux ayant déjà été réalisés dans cette chambre, celle-ci a été nettoyée avant la réalisation de notre campagne de mesures. Un « blanc de l'installation » en dioxines et furanes a également été effectué préalablement à nos essais afin de valider la qualité de l'ensemble du dispositif : chambre et gaine d'aspiration des fumées. La teneur mesurée s'élève à 6.19 pg I.TEQ/nm³ sec (blanc n°1).

Ce blanc a été réalisé dans les mêmes conditions que les prélèvements effectués lors des essais de brûlages d'échantillon, sans mise en place de la charge. 200 ml d'éthanol destinés lors des essais à allumer la charge ont été brûlés durant la réalisation du blanc.

6.2.4 Méthodologie mise en oeuvre

Les essais ont été réalisés de la façon suivante :

- mise en place d'une charge dans le bac,
- 50 ml d'éthanol sont versés sur l'échantillon,
- allumage du feu au moyen d'une tige dont l'embout est imbibé d'éthanol,
- mise en place d'une nouvelle charge dès que l'avancement de la combustion n'est plus significatif (absence de perte de poids sur la balance et contrôle visuel),

- allumage du feu au moyen d'une tige dont l'embout est imbibé d'éthanol avec si nécessaire ajout de 50 ml d'éthanol,
- l'opération de rechargement est répétée 3 à 4 fois durant l'essai.

Les dispositifs de prélèvement des polluants sont mis en route lors de l'allumage de la première charge (début de l'essai) et arrêtés, après au minimum 220 minutes de combustion, après absence de perte de poids de la dernière charge mise en place dans le bac (fin de l'essai). Les prélèvements n'ont pas été interrompus durant l'essai afin de prendre en compte les fumées restant dans la chambre de combustion notamment lors des périodes de rechargement, l'opérateur intervenant avec un équipement de protection individuel.

Les prélèvements et analyses des polluants ont été effectués selon les normes en vigueur. Les méthodologies mises en œuvre sont décrites en annexe n°1.

Les dioxines et furanes, les PCB et les HAP ont été piégés sur le même dispositif de prélèvement conformément au guide d'application X 43-551 avec notamment un changement des filtres de prélèvement toutes les deux heures.

6.2.5 Programme d'essais

Les essais suivants ont été effectués :

- 2 essais avec les échantillons prélevés dans le sud-ouest, le premier essai a été effectué avec les échantillons prélevés à 50 km de la côte (essai n°1 - les échantillons récupérés en landes humides et en landes sèches ont été rassemblés afin de réaliser un seul essai), le second avec les échantillons prélevés à 10 km du littoral (essai n°2),
- 2 essais avec les échantillons prélevés dans le sud-est, le premier essai a été effectué avec les échantillons prélevés à proximité du littoral (essai n°3), le second avec les échantillons prélevés à 50 km de la côte (essai n°4),
- 2 essais ont été effectués avec les échantillons prélevés sur les deux centres d'enfouissement technique : le premier avec un mélange comprenant 70,5% de DIB et 29,5% d'OM (essai n°5), le second avec un mélange comprenant 33,5% de DIB et 66,5% d'OM (essai n°6),
- 1 essai a été effectué avec des échantillons récupérés dans le sud-est à 50 km du littoral arrosés avec de l'eau de mer et séchés en étuve à 40°C environ (essai n°7). Ce dernier essai a été effectué afin de simuler l'extinction des feux de forêt par aspersion d'eau de mer.

Des « blancs de l'installation » ont été effectués avec un feu d'alcool (200 ml brûlés) entre chaque type de feux testé afin de vérifier l'absence de contamination de la chambre de combustion et de son conduit d'extraction des fumées.

Les teneurs en dioxines et furanes, PCB, HAP, HCl et gaz classiques (CO, CO₂, O₂, SO₂, COVT et NO_x) et le débit d'air extrait ont été mesurés. En raison d'un problème technique survenu sur notre dispositif de pesée lors des essais, la détermination de l'indice pondéral n'a pu être effectué. Le poids de chaque échantillon testé a été déterminé lors de chaque essai.

Des facteurs d'émissions ont été établis à partir de la masse de polluant émise et la masse de biomasse ou de déchets brûlés.

7. RESULTATS

7.1 VALIDATION DES RESULTATS

7.1.1 Blanc de l'installation entre chaque série de test

Les blanc de l'installation n'ont porté que sur les polluants organiques persistants. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-après :

Essais	1	2	Blanc n°2	3	4
4 HAP ($\mu\text{g}/\text{nm}^3$)	4.58	5.78	0.06	4.03	3.68
8 HAP ($\mu\text{g}/\text{nm}^3$)	23.2	40.4	0.69	26.0	21.5
16 HAP ($\mu\text{g}/\text{nm}^3$)	168	448	2.7	350	322
12 PCB (pg I.TEQ/ nm^3)	1.29	0.95	0.33	6.18	1.89
PCDD/DF(pg I.TEQ/ nm^3)	28.1	2.76	4.79	68.2	30.9

Essais	Blanc n°3	5	6	Blanc n°4	7
4 HAP ($\mu\text{g}/\text{nm}^3$)	< 0.04	1.61	1.53	< 0.16	2.18
8 HAP ($\mu\text{g}/\text{nm}^3$)	0.11	7.83	7.10	0.26	15.7
16 HAP ($\mu\text{g}/\text{nm}^3$)	2.13	103	92.7	3.78	209
12 PCB (pg I.TEQ/ nm^3)	1.14	19.7	23.8	2.32	1.17
PCDD/DF(pg I.TEQ/ nm^3)	24.07	483	334	147.9	16.8

En ce qui concerne les HAP, les valeurs de blanc sont largement inférieures aux teneurs mesurées (< 3%).

Après des brûlages fortement émetteurs de PCB et de dioxines, il est difficile de revenir rapidement à des valeurs de blanc faibles (cf. résultats du blanc n°4). Toutefois les valeurs de blanc sont largement inférieures aux teneurs postérieures mesurées à l'exception du dernier essai. Celui-ci ne semble toutefois pas avoir été perturbé par un blanc de l'installation élevé. Cela pourrait être lié au décalage dans le temps entre la réalisation du blanc n°4 (effectué le 18/09/03) et celle de l'essai 7 (effectué le 16/10/03).

Les valeurs de blanc observées montrent qu'il s'agit d'un paramètre à surveiller, notamment lorsque les teneurs mesurées sont faibles.

7.1.2 Validation des prélèvements et analyses effectués

Tous les prélèvements et analyses effectués sont conformes aux exigences des normes. Les écarts sont mentionnés en annexe n°1 dans le paragraphe « méthodologie employée ».

7.2 RESULTATS OBTENUS

Les concentrations en polluants mesurées et les facteurs d'émission déterminés sont présentés dans les tableaux n°1 à 3.

Les facteurs d'émission ont été exprimés en masse de polluants émis par kilogramme de végétaux ou déchets chargés dans le foyer (tableaux n° 2) et en masse de polluants émis par mètre carré (tableaux n°3). Ces surfaces sont estimées très approximativement en fonction de la surface débroussaillée pour les végétaux et en fonction de la surface de sols sur laquelle les déchets ont été récupérés.

Les résultats détaillés ainsi que les profils en PCDD/DF exprimés en valeur brute et en équivalent toxique sont présentés en annexe n°3.

7.3 INCERTITUDES ASSOCIEES AUX RESULTATS

Les facteurs d'émission déterminés permettent de mieux cerner les quantités de polluants émis. Ils sont toutefois assortis d'une incertitude importante, difficilement quantifiable. Les sources d'incertitudes associées à ces facteurs d'émission sont en effet nombreuses : la nature et la composition des végétaux ou des déchets brûlés, les surfaces débroussaillées pour les végétaux en particulier, la différence de positionnement et de densité des végétaux entre les conditions d'essai et la forêt, les conditions de combustion (température, vitesse de propagation du feu liée aux conditions aérauliques, etc.), la pollution de l'installation et les incertitudes de mesure ; ces dernières jouant a priori un rôle mineur (cf. annexe n°2).

8. COMMENTAIRES

8.1 COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS

8.1.1 Brûlage des végétaux

Les résultats exprimés en terme de facteur d'émission par kg de biomasse sont particulièrement homogènes. Des différences apparaissent toutefois en fonction de la provenance des végétaux (Landes ou Bouches du Rhône) mais également et surtout peut être en fonction de l'humidité de ces déchets. Visuellement les végétaux provenant du sud ouest (essais n°1 et 2) étaient plus humides (certaines espèces végétales étant relativement vertes) que ceux provenant du sud est (essais n°3 et 4) et beaucoup plus humides que ceux utilisés lors de l'essai n°7 qui ont été séchés en étuve. Ce paramètre pourrait jouer de façon très significative sur la combustion et donc sur les émissions de CO, NO_x et COVT : plus l'humidité des végétaux est faible, plus les teneurs en CO et COVT sont faibles et plus la teneur en NO_x est élevée. Cela pourrait également expliquer les plus faibles émissions de polluants organiques persistants lors de l'essai n°7. Cette hypothèse nécessiterait toutefois un plus grand nombre d'essais pour être vérifiée et confirmée.

Les émissions d'HCl sont légèrement plus importantes lors du brûlage des végétaux provenant du sud ouest.

Les émissions de HAP sont très proches d'un essai à l'autre. Seul l'essai n°7 présente des facteurs d'émission sensiblement plus faibles.

Essais	1 (sud ouest - arrière pays)	2 (sud ouest - milieu côtier)	3 (sud est - milieu côtier)	4 (sud est - arrière pays)	5 (29.5% OM / 70.5% DIB)	6 (66.5% OM / 33.5% DIB)	7 (4 - avec ajout eau de mer et séchage)
Date	08/09/2003	09/09/2003	11/09/2003	12/09/2003	16/09/2003	17/09/2003	16/10/2003
Période	14h38 - 18h30	11h00 - 16h20	10h25 - 15h54	10h06 - 15h56	13h30 - 16h40	11h13 - 15h35	14h00 - 17h55
Masse chargée (kg)	18.53	24.84	24.94	25.84	11.39	11.33	35.22
Masse brûlée (kg)	17.70	22.70	24.05	23.89	6.52	6.59	31.21
Masse brûlée / masse chargée (%)	94.0	91.2	96.4	92.4	57.3	58.2	88.7
Débit (nm ³ /h)	1806	1722	1725	1732	1804	1810	1785
O ₂ (%)	20.5	20.5	20.5	20.4	20.4	20.5	20.4
CO (mg/nm ³)	226	214	164	167	29	30	263
SO ₂ (mg/nm ³)	38	42	47	36	10	17	11
NO _x (mg éq. NO ₂ /nm ³)	3	3	5	6	4	3	13
COVT (mg éq. C/nm ³)	75	79	53	44	17	26	43
HCl (mg/nm ³)	0.050	0.067	0.017	0.034	5.62	0.139	0.024
4 HAP (µg/nm ³)	4.58	5.78	4.03	3.68	1.61	1.53	2.18
8 HAP (µg/nm ³)	23.2	40.4	26.0	21.5	7.83	7.10	15.7
16 HAP (µg/nm ³)	168	448	350	322	103	92.7	209
12 PCB (pg I.TEQ/nm ³)	1.29	0.95	6.18	1.89	19.7	23.8	1.17
PCDD/DF (pg I.TEQ/nm ³)	28.1	2.76	68.2	30.9	483	334	16.8

Tableau n°1 : teneurs en polluants mesurés

Essais	1 (sud ouest - arrière pays)	2 (sud ouest - milieu côtier)	3 (sud est - milieu côtier)	4 (sud est - arrière pays)	5 (29.5% OM / 70.5% DIB)	6 (66.5% OM / 33.5% DIB)	7 (4 - avec ajout eau de mer et séchage)
Date	08/09/2003	09/09/2003	11/09/2003	12/09/2003	16/09/2003	17/09/2003	16/10/2003
Période	14h38 - 18h30	11h00 - 16h20	10h25 - 15h54	10h06 - 15h56	13h30 - 16h40	11h13 - 15h35	14h00 - 17h55
CO (g/kg)	83.8	79.0	62.2	65.3	14.5	21.2	52.2
SO ₂ (g/kg)	14.0	15.6	17.7	14.0	5.0	12.0	2.2
NO _x (g éq. NO ₂ /kg)	1.22	1.29	2.02	2.25	1.85	2.44	2.61
COVT (g éq. C/kg)	28.4	29.7	20.6	17.5	8.8	18.4	8.8
HCl (g/kg)	0.019	0.025	0.006	0.013	2.82	0.097	0.005
4 HAP (mg/kg)	1.70	2.14	1.53	1.44	0.81	1.07	0.43
8 HAP (mg/kg)	8.60	14.9	9.86	8.42	3.93	4.95	3.11
16 HAP (mg/kg)	62.4	166	133	126	51.8	64.6	41.5
12 PCB (ng I.TEQ/kg)	0.48	0.35	2.34	0.74	9.88	16.6	0.23
PCDD/DF (ng I.TEQ/kg)	10.4	1.02	25.9	12.1	242	233	3.32

Tableau n°2 : facteurs d'émission (masse de polluants émis par kilogramme de bois ou de déchets chargés)

Essais	1 (sud ouest - arrière pays)	2 (sud ouest - milieu côtier)	3 (sud est - milieu côtier)	4 (sud est - arrière pays)	5 (29.5% OM / 70.5% DIB)	6 (66.5% OM / 33.5% DIB)	7 (4 - avec ajout eau de mer et séchage)
Date	08/09/2003	09/09/2003	11/09/2003	12/09/2003	16/09/2003	17/09/2003	16/10/2003
Période	14h38 - 18h30	11h00 - 16h20	10h25 - 15h54	10h06 - 15h56	13h30 - 16h40	11h13 - 15h35	14h00 - 17h55
CO (g/m ²)	394.3	490.8	388	422	82.5	120	460
SO ₂ (g/m ²)	65.8	97.1	110	90.2	28.6	67.8	19.0
NO _x (g éq. NO ₂ /m ²)	5.74	8.02	12.63	14.5	10.6	13.8	23.0
COVT (g éq. C/m ²)	134	184	129	113	49.9	104	77.3
HCl (g/m ²)	0.087	0.154	0.040	0.172	16.0	0.549	0.042
4 HAP (mg/m ²)	8.0	13.3	9.53	18.6	4.60	6.1	3.8
8 HAP (mg/m ²)	40.5	92.8	61.5	109	22.4	28.1	27.4
16 HAP (mg/m ²)	294	1030	828	1628	295	366	365
12 PCB (ng I.TEQ/m ²)	2.25	2.18	14.6	9.55	56.3	94.2	2.04
PCDD/DF (ng I.TEQ/m ²)	49.1	6.3	161.2	156	1380	1321	29.3

Tableau n°3 : facteurs d'émission (masse de polluants émis par m²)

En ce qui concerne les dioxines et furanes, mis à part l'essai n°2 qui présente une teneur voisine de celles des blanc n°1 et 2 de l'installation, les résultats sont assez homogènes allant de 28,1 à 68,2 pg I.TEQ/nm³ et de 10,4 à 25,9 ng I.TEQ/kg et sensiblement supérieures aux valeurs de blanc de l'installation observées. Un facteur d'émission moyen de 13,1 ng I.TEQ/kg pourrait être retenu (moyenne des essais n°1, 3 et 4). Pour les raisons évoquées ci-dessus, les résultats des essais n°2 et 7 ont été écartés. Le profil de l'essai n°2 étant par ailleurs assez différent des autres avec notamment un déficit de 1,2,3,4,7,8,9 heptaCDF.

L'influence des embruns, pris en compte par des prélèvements de végétaux à moins de 10 km de la côte (essais n°2 et 3), sur les émissions d'HCl de dioxines et furanes et de PCB n'est pas notable. L'ajout d'eau de mer (essai n°7) ne semble pas non plus avoir un effet important. L'influence de ce paramètre, si influence il y a, a toutefois été probablement masquée par le séchage des végétaux qui a considérablement amélioré la combustion.

8.1.2 Brûlage des déchets

Là encore, l'humidité des déchets pourrait jouer un rôle majeur sur les émissions de polluants. Les OM étant plus humides que les DIB, les émissions de CO, COVT et HAP sont plus élevées lorsque la proportion d'OM brûlées croît. Il pourrait en être de même pour les dioxines et furanes. Lors de l'essai n°5, ce phénomène est probablement masqué par la présence en quantité de chlore dans les DIB : les émissions de HCl de cet essai sont environ 30 fois plus élevées que celles de l'essai n°6.

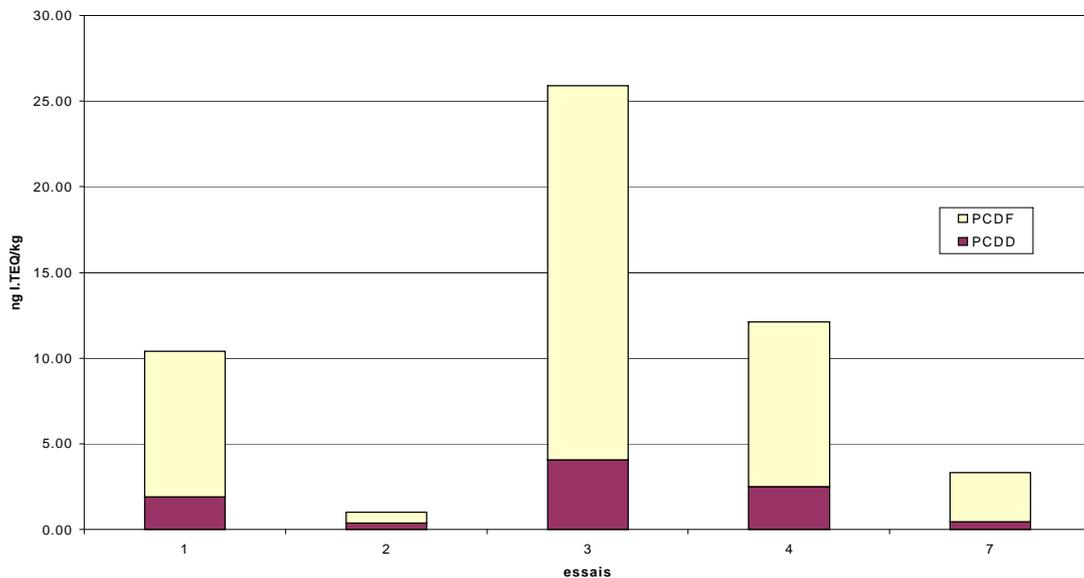
Si les émissions de HAP provenant du brûlage des déchets sont inférieures à celles provenant du brûlage des végétaux, les émissions de PCDD/DF et PCB sont au contraire très largement supérieures : d'un facteur 10 environ.

8.2 REPARTITION ENTRE LES DIFFERENTES FAMILLES CHIMIQUES

8.2.1 PCDD/PCDF

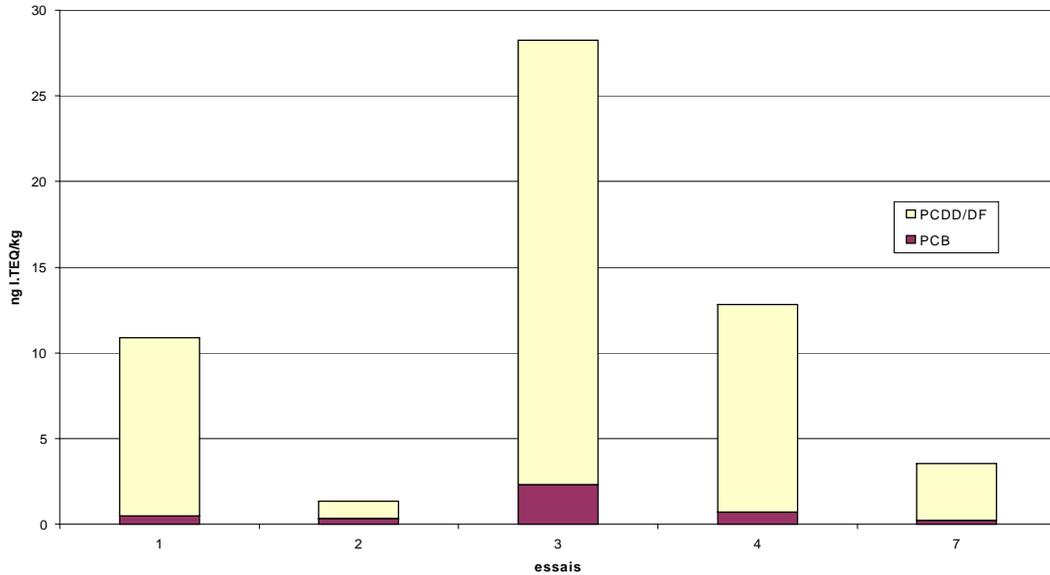
En équivalent toxique, les furanes sont majoritaires.

Pour le brûlage des végétaux, les furanes représentent en moyenne 77,5% des émissions. Cette proportion étant respectivement de 81,6, 62,4, 84,2 et 79,2% pour les essais n°1, 2, 3 et 4.



En ce qui concerne le brûlage des déchets, les furanes représentent 85,5 et 84,6% des émissions respectivement pour les essais n°5 et 6.

8.2.2 Répartition PCB/PCDD-DF



Les PCB représentent environ 6% de l'équivalent toxique total (PCB + PCDD/DF). Cette valeur évolue entre 4 (essai n°5) et 8% (essai n°3) à l'exception de l'essai n°2 où les PCB représentent 26% de l'équivalent toxique total.

Il n'y a donc pas de différence significative de répartition PCB/PCDD-DF entre les brûlages de végétaux et ceux de déchets.

8.3 COMPARAISON AVEC DES DONNEES DE LA LITTERATURE

A notre connaissance, deux autres études ont été réalisées sur ce sujet.

L'US EPA (Environmental Protection Agency)³ a réalisé des essais similaires afin de quantifier les émissions de dioxines et furanes des feux de forêts. Huit essais ont été réalisés avec 4 échantillons provenant de Caroline du Nord (intérieur du pays à environ 200 km de la côte Atlantique) et 4 échantillons provenant de l'Orégon (en bordure de la côte Pacifique). Ces échantillons étaient composés d'aiguilles de conifères recueillies sur les branches et ramassées sur les sols. La teneur moyenne des quatre essais réalisés avec les échantillons provenant de Caroline du Nord est de 15 ng I.TEQ/kg brûlés (fourchette 1 à 56, avec un essai qui s'écarte significativement des trois autres). La teneur moyenne des quatre essais réalisés avec les échantillons provenant de l'Orégon est de 25 ng I.TEQ/kg brûlés (fourchette 14 à 47). L'auteur souligne que cette différence est significative et qu'elle pourrait être liée à une plus forte teneur en chlore des échantillons provenant de l'Orégon, la végétation côtière étant particulièrement riche en cet élément. Les PCDF sont par ailleurs majoritaires lors des essais effectués avec les échantillons provenant de l'Orégon et minoritaires pour ceux provenant de Caroline du Nord.

³ PCDD/F emissions from forest fire simulations, Gullett and Touati, Atmospheric Environment - Volume 37, février 2003, p. 803-813

Ces facteurs d'émission (valeur moyenne de 20 ng I.TEQ/kg, fourchette 1 à 56) sont totalement concordant avec ceux obtenus dans le cadre de notre étude : 10,5 ng I.TEQ/kg (fourchette : 1,0 à 25,9). Quant à l'influence de la forte teneur en chlore des végétaux prélevés en milieu côtier, elle n'est pas suffisamment significative pour être mise en évidence lors de nos essais. D'autres paramètres tels que l'humidité joue probablement un rôle plus important.

Le gouvernement australien⁴ a également réalisé une étude afin de mieux cerner les émissions de dioxines et furanes des feux de végétation (savanes et forêts essentiellement) du Bush. 21 essais sur feux réels et 19 tests de laboratoire, menés dans une galerie permettant de reproduire des incendies, ont été effectués. Pour déterminer un facteur d'émission de dioxines et furanes sur feux réels, des mesures de CO₂ dans les fumées et dans l'air ambiant (concentration de fond) ont été réalisées. Le carbone contenu dans la biomasse (50% en masse environ) est libéré à 90% sous forme de CO₂ lors de la combustion. Il est alors possible de déduire, des teneurs en PCDD/DF des fumées et de l'air ambiant mesurées, des facteurs d'émission de ces polluants au moyen de l'équation suivante :

$$FE_{PCDD/DF} = \frac{1}{C_{biomasse}} \times \left(\frac{([PCDD/DF]_{fumées} - [PCDD/DF]_{ambiante})}{([CO_2]_{fumées} - [CO_2]_{ambiante})} \right)$$

Ceux-ci sont compris entre 0.1 et 2.9 ng I.TEQ/kg brûlés. Les dioxines représentent 70% des émissions, les furanes et les PCB 20 et 10% respectivement. Les résultats des tests de laboratoires sont compris entre 1.5 et 59 ng I.TEQ/kg brûlés, soit des émissions 10 fois supérieures environ à celles des feux réels. La part des PCDD dans les émissions est de 35 à 40%. Les auteurs expliquent les différences entre ces résultats par un temps de passage des fumées à une température supérieure à 200°C plus longue dans le cas des tests de laboratoire.

Les résultats des tests de laboratoire sont comparables aux résultats obtenus dans le cadre de cette étude mais les proportions de PCDD, PCDF et PCB dans les émissions sont totalement différentes. Le mécanisme de formation de ces polluants est donc différent. Les faibles résultats obtenus sur feux réels pourraient aussi être liés aux caractéristiques des végétaux brûlés.

8.4 ESTIMATION DES EMISSIONS FRANÇAISES

A partir des facteurs d'émission déterminés et de la connaissance des surfaces brûlées (30000 hectares par an en moyenne sur les deux dernières décennies), les émissions françaises peuvent être estimées :

⁴ Dioxin emissions from bushfires in Australia, Meyer, Beer and Muller, Australian Government - National Dioxins Program Technical report n°1 - www.deh.gov.au/industry/chemicals/dioxins/pubs/report1a.pdf

Polluants	Unités	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4	moyenne
CO	t/an	118300	147230	116250	126540	127082
COVT	t/an	40128	55289	38574	33870	41965
HCl	kg/an	26	48	14	23	28
HAP (16 éléments)	kg/an	88219	308975	248590	244261	222511
HAP (8 éléments)	kg/an	12151	27924	18445	16314	18708
HAP (4 éléments)	kg/an	2399	3981	2859	2789	3007
PCDD/DF	g I.TEQ/an	14,7	1,9	48,4	23,4	28,8*
PCB	g I.TEQ/an	0,68	0,65	4,4	1,4	1,8

* en écartant le résultat de l'essai n°2 pour les raisons évoquées ci-dessus

Tableau n°5 : estimation des émissions annuelles françaises

Ce calcul est très approximatif en raison notamment de la représentativité de la surface débroussaillée. La masse de biomasse par hectare, 5900 kg, paraît faible. Elle prend sûrement relativement mal en compte la masse de végétation haute, ce qui serait à l'origine d'une sous estimation des émissions.

Les facteurs d'émission exprimés en kg de biomasse brûlée sont a priori plus fiables. Ils devront être utilisés en priorité afin de quantifier les émissions françaises, à condition bien sûr de connaître assez précisément la masse de biomasse par hectare (hors bois de gros diamètre) des différentes zones géographiques françaises.

Seules les émissions de PCDD/DF représentent une part significative des émissions françaises (7,5% environ).

En ce qui concerne les émissions des feux de décharge, les surfaces brûlées n'étant pas connues, les quantités de polluants émises sont difficilement chiffrables.

9. LISTE DES ANNEXES

Annexe	Désignation précise	Nb de pages
1	Méthodologies employées : prélèvements et analyses	5
2	Intervalles de confiance associés aux mesures	2
3	Résultats détaillés des mesures - Mesures des débits - Evolution des teneurs en polluants mesurés en continu	39
4	Résultats détaillés : HCl et HAP	11
5	Résultats détaillés : PCB et PCDD/DF	36