

RAPPORT D'ÉTUDE  
N°DRC-11-118389-04583A

12/04/2011

**Facteurs d'émission de polluants de feux  
simulés de déchets et de produits issus de la  
biomasse**

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable |*



**Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de déchets et de biomasse.**

**MEDDTL**

Grande Arche de la Défense

Paris Nord

92055 LA DEFENSE CEDEX

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Adrien DERMIGNY, Claude DIMY, Pascal DUBOIS, Amandine FIEVET, Serge COLLET

## PRÉAMBULE

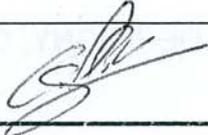
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

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

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

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

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

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

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. RESUME</b> .....	<b>7</b>
<b>2. GLOSSAIRE</b> .....	<b>9</b>
<b>3. CONTEXTE</b> .....	<b>11</b>
<b>4. OBJECTIFS DE L'ETUDE</b> .....	<b>13</b>
<b>5. METHODOLOGIE</b> .....	<b>15</b>
- 5.1 Généralités.....	15
- 5.2 Méthodes de détermination des facteurs d'émission recensées.....	15
- 5.3 Méthodologies mises en œuvre .....	16
- 5.4 Déroulement des essais .....	17
<b>6. EMISSIONS POLLUANTES</b> .....	<b>19</b>
- 6.1 Généralités sur la combustion de la biomasse à l'air libre .....	19
- 6.2 Difficultés d'utilisation des facteurs d'émission de la littérature.....	20
6.2.1 Expression des données.....	20
6.2.2 Représentativité des facteurs d'émission.....	20
- 6.3 Synthèse des résultats par type de biomasse et de déchets brûlés .....	21
6.3.1 Déchets verts de jardin (biomasse naturelle) .....	21
6.3.2 Résidus agricoles.....	22
6.3.3 Ecobuage et feux de forêt .....	24
6.3.4 Coupes d'arbres fruitiers .....	25
6.3.5 Pneumatiques .....	26
6.3.6 Câbles électriques.....	27
6.3.7 Bois de démolition.....	28
6.3.8 Traverses de chemins de fer, bois créosotés et traités CCA.....	30
- 6.4 Synthèse des résultats par polluant.....	31
6.4.1 Principaux gaz de combustion : O <sub>2</sub> - CO – NO <sub>x</sub> - COVT .....	31
6.4.2 Poussières .....	36
6.4.3 Dioxines-Furanes – PCB.....	37
6.4.4 HAP.....	40
6.4.5 HCL.....	43
6.4.6 Métaux lourds.....	43
6.4.7 BTEX- Aldéhydes.....	44

<b>7. COMMENTAIRES.....</b>	<b>47</b>
<b>8. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>49</b>
<b>9. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>53</b>

## **1. RESUME**

Cette étude porte sur la détermination des facteurs d'émissions de polluants (CO, COVT, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, HAP, PCB, PCDD/DF, poussières) issus de la combustion à l'air libre de biomasse et de déchets. Ces facteurs d'émission (quantités de polluants émis par unité de masse de biomasse ou de déchet brûlée) sont utilisés pour évaluer les émissions françaises liées à ces pratiques dans le cadre de l'inventaire national d'émissions.

Les essais ont porté sur les brûlages à l'air libre de « déchets verts », de coupes d'arbres fruitiers, de traverses de chemins de fer, de bois de démolition et de pneus. Les brûlages ont été réalisés à l'intérieur d'une enceinte de grand volume fermée équipée d'une hotte d'extraction des fumées permettant de canaliser les émissions et donc de les quantifier plus aisément.

Ce rapport reprend également des résultats d'études plus anciennes menées par l'INERIS qui portaient sur les feux de forêts et de câbles électriques. Une étude bibliographique a également été effectuée afin de comparer les données obtenues à celles de la littérature.

Ces brûlages représentent des sources d'émission pouvant avoir un impact local sur la qualité de l'air et la pollution des sols.

La biomasse est plutôt à l'origine d'émissions de particules et de matières organiques (COV et HAP) du fait de la piètre qualité de la combustion. Les résultats obtenus mettent en évidence de faibles facteurs d'émission en dioxines et furanes.

Quant aux déchets, les émissions sont étroitement liées à leur composition avec des facteurs d'émission élevés en dioxines et furanes lors du brûlage de câbles électriques et de bois de démolition, en HAP lors du brûlage de traverses, de câbles électriques et surtout de pneus, et en métaux lourds lors du brûlage de bois de démolition.



## 2. GLOSSAIRE

- CO : monoxyde de carbone
- CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone
- SO<sub>2</sub> : dioxyde de soufre
- NO<sub>x</sub> : oxydes d'azote (NO + NO<sub>2</sub>)
- COVT : composés organiques volatils totaux
- HCl : acide chlorhydrique
- PCB : polychloro-biphényles
- PCDD/DF : dioxines et furanes
- PM10 : poussières de diamètre inférieur à 10 µm
- PM2.5 : poussières de diamètre inférieur à 2,5 µm
- HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques : liste des 16 HAP, des 8 HAP et des **4 HAP** habituellement dosés : naphtalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, chrysène, pyrène fluoranthène, benzo (a) anthracène, **benzo (b) fluoranthène**, **benzo (k) fluoranthène**, **benzo (a) pyrène**, dibenzo (a,h) anthracène, **indeno (1,2,3-cd) pyrène**, benzo (g,h,i) pérylène
- TEQ : équivalent toxique WHO 98 ; I.TEQ : équivalent toxique NATO
- PVC : polychlorure de vinyle



### 3. CONTEXTE

Le brûlage à l'air libre est une pratique malheureusement encore très courante qui occasionne de nombreuses nuisances :

- dégradation de la qualité de l'air,
- odeurs,
- pollution des sols,
- contamination potentielle de la chaîne alimentaire par les polluants générés, etc.



Lors de la combustion de la biomasse à l'air libre (donc 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.



#### **4. OBJECTIFS DE L'ETUDE**

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 en simulant ces feux dans une chambre de combustion. Ces facteurs d'émission associés à des estimations de quantités brûlées, sont utiles pour :

- quantifier les émissions annuelles de ces sources pour une meilleure prise en compte dans l'inventaire national,
- hiérarchiser l'importance et l'influence de ces pratiques par rapport aux autres sources de polluants.

Notre étude a porté sur :

- la combustion d'un certain nombre de produits issus de la biomasse : déchets verts, coupe d'arbres fruitiers et de déchets : déchets de démolition, pneumatiques, traverses,
- la reprise de données plus anciennes établies par l'INERIS portant sur les feux de forêts et les feux de câbles électriques,
- la comparaison des résultats obtenus sur ces différents matériaux, exprimés en termes de facteurs d'émission avec les données de la littérature.



## **5. METHODOLOGIE**

### **5.1 GENERALITES**

Dans le cas de la combustion de la biomasse ou de déchets à l'air libre, les émissions annuelles nationales sont évaluées à partir des facteurs d'émission de polluants, déterminés au moyen de campagnes de mesures et des quantités de biomasse brûlée estimées.

Le présent document reprend l'ensemble des résultats des essais menés à l'INERIS et recense, de façon non exhaustive, les facteurs d'émission de la littérature, pour les principaux types de brûlages à l'air libre ayant lieu sur le territoire français.

Ces valeurs ont été déterminées soit en laboratoire (dans des chambres de simulation de ces feux) ou soit directement sur site en conditions réelles.

Dans le cadre du présent document, ont été caractérisés :

- les quatre catégories de biomasse suivantes :
  - les déchets verts ne comprenant que de la biomasse naturelle de façon à simuler les feux de fond de jardin,
  - les résidus agricoles : résidus de plantes céréalières restants dans les champs après récolte,
  - l'écobuage et les feux de forêts,
  - les coupes d'arbres fruitiers : élagage saisonnier de ces arbres.
  
- Les quatre déchets suivants ont également été retenus :
  - les pneumatiques,
  - les câbles électriques,
  - les traverses de chemins de fer et autres bois créosotés,
  - le bois de démolition afin de simuler les feux de chantier.

### **5.2 METHODES DE DETERMINATION DES FACTEURS D'EMISSION RECENSEES**

Plusieurs approches décrites par Delmas et al. 1995 peuvent être utilisées pour caractériser les émissions de polluants lors du brûlage de biomasse ou de déchets à l'air libre.

La première consiste à déterminer les concentrations en polluants recherchés dans l'air ambiant à une distance plus ou moins grande de la source. Elle permet de bien caractériser l'impact de cette source sur son environnement immédiat, notamment sur la qualité de l'air et l'exposition des populations, mais ne permet pas de calculer des facteurs d'émission de polluants du fait du manque d'informations sur les quantités brûlées ou sur les quantités de polluants générées.

La seconde approche consiste à établir des facteurs d'émission exprimés sous la forme de quantité de polluants émise par unité de masse de matériau brûlé. Elle permet de comparer les résultats obtenus entre eux, de hiérarchiser les différentes sources et de calculer les émissions annuelles nationales connaissant les quantités de biomasse ou de déchets brûlées.

Cette seconde approche peut être menée de différentes manières :

- l'utilisation d'un ratio d'émission et du bilan carbone : cette méthode consiste à déterminer un ratio d'émission entre le ou les polluants recherchés et un traceur de la combustion en effectuant, sur le terrain, des mesures du ou de ces polluants et de ce traceur dans le panache et dans l'air ambiant non impacté par le brûlage à l'air libre. La mesure dans l'air ambiant est utilisée pour corriger les résultats de mesure de concentrations dans le panache de la pollution de fond. Les traceurs utilisés sont en général le CO<sub>2</sub> et le CO. Le premier est utilisé dans le cas d'une combustion vive, le second est plutôt utilisé dans le cas des feux couvant.

Les ratios d'émission peuvent ensuite être convertis en facteurs d'émission connaissant le facteur d'émission du traceur obtenu en réalisant un bilan carbone et les masses molaires du ou des composés recherchés et du traceur. Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter de connaître les quantités de matière brûlées.

- la réalisation d'essai en chambre de combustion : cette méthode consiste à collecter tous les effluents gazeux émis lors du brûlage en effectuant celui-ci à l'intérieur d'une chambre de combustion. Les polluants recherchés sont alors mesurés dans de bonnes conditions (sur une gaine d'extraction des fumées). La biomasse ou les déchets sont brûlés en tas en petites quantités (quelques grammes ou quelques kilogrammes ou dizaine de kilogrammes) de façon à simuler un brûlage à l'air libre. Connaissant la quantité de matière brûlée, des facteurs d'émission des polluants recherchés peuvent être établis.
- la réalisation d'essai en soufflerie : cette méthode, similaire à la précédente, consiste à effectuer les essais dans un tunnel de combustion au lieu d'une chambre afin de contrôler la vitesse de vent à l'intérieur. Cette méthode a été développée par l'université de Californie (Jenkins et al. 1996) pour simuler le brûlage de résidus agricoles afin de prendre en compte la vitesse du vent et le mode de propagation latéral de ce type de feux.

### **5.3 METHODOLOGIES MISES EN ŒUVRE**

Les essais doivent être réalisés dans des locaux adaptés, suffisamment vastes pour que la simulation d'un feu à l'air libre reste pertinente. L'INERIS dispose de chambres dédiées à ce type de simulations de brûlages et plus globalement à l'amélioration des connaissances dans le domaine des risques incendie.

Les essais ont été effectués dans une chambre de combustion de 80 m<sup>3</sup> permettant d'effectuer des brûlages d'échantillons de quelques kg et de surface voisine de 0,5 à 1 m<sup>2</sup>. L'échantillon à tester est placé sur une balance afin de déterminer la perte en masse lors de l'essai.

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 l'ordre de 2400 m<sup>3</sup> par heure permet de ventiler suffisamment la chambre et d'obtenir des conditions d'essais représentatives des conditions naturelles de brûlage à l'air libre. L'air de combustion est introduit par la porte et/ou deux lucarnes situées sur des côtés distincts de la chambre.

L'ensemble du flux gazeux émis est canalisé, ce qui permet de ramener la caractérisation à celle d'un simple effluent en cheminée, en mettant en œuvre les méthodes de mesurages normalisées adaptées. Beaucoup d'entre elles sont des méthodes de référence citées à l'Arrêté du 7 juillet 2009 relatif aux modalités d'analyse dans l'air et dans l'eau dans les ICPE et aux normes de référence, pour lesquels l'Institut est accrédité. Les méthodes utilisées dans le cadre de ces essais sont décrites en annexe.

Des essais de brûlage de divers matériaux ayant déjà été réalisés dans cette chambre, celle-ci a été nettoyée avant la réalisation de nos essais. Un blanc d'installation a également été effectué avant chaque type d'essais (pneu / bois de démolition / déchets verts / etc.), permettant de garantir la non contamination des systèmes de prélèvement (propreté des instruments...), de l'ensemble de l'installation d'essais et notamment de la chambre de combustion et de son conduit d'extraction des fumées. Ces blancs se sont déroulés dans les mêmes conditions que les prélèvements effectués lors des essais de brûlages des combustibles étudiés, sans la mise en place de la charge.

#### **5.4 DEROULEMENT DES ESSAIS**

Le bac est chargé avec la biomasse ou les déchets à tester. Cette charge est allumée avec quelques millilitres d'éthanol. Lorsque la charge est significativement consommée, le bac est rechargé de façon à obtenir une période de prélèvement suffisamment longue. Les dispositifs de prélèvement de polluants ont été mis en service en même temps. La porte de la chambre reste ouverte tout au long de l'essai pour un apport en air ambiant constant. Les prélèvements ont été effectués sur une durée de quatre heures environ sans interruption.

Lors des essais de brûlage de pneus, en vue d'amorcer le feu, des petits morceaux de bois et brindilles ont été disposés dans le bac, puis allumés à l'aide d'un chalumeau et de quelques millilitres d'éthanol. Une fois le feu déclenché, deux pneus de même marque pesant 6 kg environ chacun y ont été introduits. Des formations de fumées noires, en quantité importante, ont alors été observées dès les premières minutes de combustion. Bon nombre de polluants n'ont pu être mesurés du fait des trop fortes teneurs en poussières générées par la combustion occasionnant une trop forte perte de charge et un arrêt de nos systèmes de pompage de l'échantillon. Ces essais mériteraient donc d'être refaits en réduisant la charge de déchet brûlée ou en utilisant une autre chambre disposant d'un débit d'extraction plus élevé permettant une meilleure dilution des fumées.

Pour les essais de brûlage des bois de démolition, les morceaux de bois de grands formats ont été découpés en petits morceaux (< 50 cm) afin d'être introduits dans le bac.



## **6. EMISSIONS POLLUANTES**

### **6.1 GENERALITES SUR LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE A L'AIR LIBRE**

D'une manière générale, le brûlage à l'air libre correspond à des conditions de combustion très médiocres et à des émissions de polluants importantes comme en témoignent les valeurs des facteurs d'émission relatifs à la biomasse naturelle présentées ci-après.

La combustion de la biomasse à l'air libre se déroule en deux phases : une phase de combustion vive (feu chaud avec présence de flamme) et une phase de combustion lente (feu couvant sans flamme).

Etant donné que l'essentiel de la matière est brûlé lors de la période de combustion vive, les émissions de polluants proviennent en général essentiellement de cette phase même si les concentrations en polluants sont plus importantes lors d'un feu couvant (Delmas et al. 1995).

Les paramètres qui influencent les émissions de polluants, notamment de poussières et de composés organiques (Hays et al. 2005, Dhammapala et al. 2006) sont multiples :

- Le manque d'oxygène,
- la charge en combustible, le conditionnement (dimensions),
- l'essence de bois,
- les caractéristiques physico-chimiques, la présence de métaux, la teneur en eau,
- et la météorologie.

Les interactions entre ces différents paramètres sont, par ailleurs, complexes et difficiles à appréhender.

L'humidité joue souvent un rôle important, notamment sur les émissions de particules et de matière organique. Pour une biomasse donnée, les émissions les plus faibles sont généralement obtenues avec la biomasse la plus sèche.

Pour les émissions de certains polluants, notamment organiques, la qualité de la combustion, notamment un apport d'air suffisant, joue un rôle prépondérant et intervient donc significativement sur le facteur d'émission. L'incertitude associée aux facteurs d'émission de ces polluants est donc sensiblement plus importante que celle associée aux facteurs d'émission de polluants qui ne dépendent que de la nature de la biomasse ou du déchet brûlé.

Des composés organiques oxygénés volatils et semi-volatils sont émis en assez grande quantité du fait de la décomposition thermique de la cellulose.

## **6.2 DIFFICULTES D'UTILISATION DES FACTEURS D'EMISSION DE LA LITTERATURE**

### **6.2.1 EXPRESSION DES DONNEES**

Les facteurs d'émission sont exprimés en masse de polluants émis par masse de biomasse (sèche ou humide) brûlée. Afin d'être comparées aux données obtenues, les données de la littérature ont parfois dû être exprimées dans une unité différente en tenant compte des humidités précisées dans les publications lorsque celles-ci étaient disponibles ou à défaut, en retenant une humidité de la biomasse de 45% dans le cas des feux de forêt et un rapport 90/10 entre combustion vive et combustion lente (90% d'émissions en combustion vive / 10% en combustion lente) lorsque des valeurs distinctes pour chaque type de combustion étaient fournies.

Nota : en retranchant l'humidité à la masse de biomasse brute, la masse de biomasse sèche peut être obtenue.

### **6.2.2 REPRESENTATIVITE DES FACTEURS D'EMISSION**

Le caractère représentatif des essais conduisant aux facteurs d'émission de la littérature est également un autre point important à contrôler.

Par exemple la biomasse brûlée à l'étranger peut avoir des caractéristiques différentes de celle brûlée sur le territoire français. Les facteurs d'émission de la littérature doivent donc être exploités en regard des méthodologies utilisées et de la nature de la biomasse brûlée.

Ainsi, dans le cadre du présent rapport, les valeurs correspondantes à la forêt tempérée ont par exemple été privilégiées. A défaut, pour certains polluants, d'autres données ont pu être utilisées.

Pour l'écobuage, seules des données de la littérature ont été retenues. Or celles-ci correspondent davantage à des brûlages de plantes herbacées qu'à des brûlages de fougères et genêts plus représentatifs des pratiques françaises.

En ce qui concerne les déchets verts, la composition (branches, feuilles et herbes) est mal connue et le facteur d'émission relatif à ces brûlages ne peut être simplement extrapolé en retenant un pourcentage des trois facteurs d'émission pris individuellement ; un mélange de branches, feuilles et herbes ne brûlant pas de la même manière que chacun matériaux pris isolément.

Au sein même du territoire français, les pratiques de brûlage et les caractéristiques de la biomasse peuvent changer (en nature, en taux d'humidité, etc.), rendant difficile une approche globale menée sur un nombre limité d'essais.

Enfin, du fait du manque d'information disponible dans certaines publications, l'attribution à la bonne source des facteurs d'émission recensés est une difficulté supplémentaire.

Pour l'ensemble de ces raisons, une incertitude importante est associée aux facteurs d'émission déterminés.

## 6.3 SYNTHÈSE DES RESULTATS PAR TYPE DE BIOMASSE ET DE DECHETS BRULES

### 6.3.1 DECHETS VERTS DE JARDIN (BIOMASSE NATURELLE)

#### ❖ Généralités

Ces brûlages permettent une élimination de la biomasse naturelle (feuilles, branchages, tontes, etc.) ne contenant a priori pas d'éléments contaminants. Le brûlage à l'air libre des « déchets verts » est restreint par les règlements sanitaires départementaux et certains arrêtés municipaux.

Ces brûlages sont concentrés sur une période relativement courte de l'année, généralement en automne, et sont susceptibles d'occasionner localement des nuisances importantes (détérioration de la qualité de l'air, problèmes d'odeurs, etc.).

Notons par ailleurs, que de plus en plus de particuliers brûlent ces déchets dans des incinérateurs de jardin, sorte de bidons ouverts en acier galvanisé équipé dans leur partie basse d'orifices permettant l'introduction de l'air.

#### ❖ Composition et particularités des feux de jardin

Ces déchets, généralement composés de plantes, de bois morts, de feuilles, de tontes de pelouse, etc. se caractérisent par leurs teneurs en eau élevées. Ces dernières dépendent des conditions météorologiques, notamment de la pluviométrie, les jours précédents le brûlage. Le brûlage de ces déchets se fait généralement en tas.

Certains de ces déchets verts sont susceptibles d'avoir été traités par des agents chimiques tels que des fongicides, des pesticides, etc. qui peuvent apporter à l'état de traces des produits contaminants.

#### ❖ Emission de polluants :

Pour simuler ces feux, nous avons procédé à deux brûlages de feuilles et de branches, le premier comprenant une forte proportion de feuilles, le second une forte proportion de branches. Les taux d'humidité de la biomasse utilisée lors de ces essais étaient respectivement de 45,6 et 62,0%.

Quelques publications traitent des émissions de polluants issues de brûlage de déchets verts.

#### Dioxines et furanes

Les émissions de déterminées lors de nos essais sont extrêmement faibles : 0,13 ng TEQ/kg sur brut en moyenne. Les émissions lors d'un brûlage avec une proportion importante de feuilles par rapport aux branches (0,17 ng TEQ/kg sur brut) ne sont pas très différentes de celles d'un brûlage de branches avec une proportion faible de feuilles (0,09 ng TEQ/kg sur brut) bien que le type de combustion de ces deux déchets verts soit assez différent : feu couvant pour les feuilles, feu vif pour les branches. Le brûlage des déchets verts dans des incinérateurs de jardin n'améliorant pas significativement la combustion, ne minimisera pas la formation de ces polluants (Wevers et al. 2004).

### HAP (8 éléments dosés)

Les facteurs d'émission obtenus lors de nos essais, 3480 et 6312 µg/kg sur brut, respectivement pour les branches et les feuilles, sont comparables à ceux de la littérature : 2910, 6295 µg/kg sur brut - Lutes et al. 1996. La médiocre qualité de la combustion lors de l'essai de brûlage des feuilles (humidité élevée, manque d'oxygène) favorise la formation de ces polluants.

### Poussières fines (PM2.5)

Lutes et al. 1996 détermine un facteur d'émission moyen de 8,3 g/kg sur brut, avec des valeurs qui évoluent dans une plage allant de 4,6 à 14,1 g/kg sur brut. Hays et al. 2002 a déterminé un facteur d'émission de 10,8 g/kg sur brut pour un feu de feuilles et de 20,9 g/kg sur brut en moyenne pour des feux d'aiguilles de conifères. Lors de brûlage de déchets verts (feuilles, branches, herbes), Wardoyo 2007 obtient un facteur d'émission moyen en PM2.5 de l'ordre de 1,2 g/kg sur brut.

### Poussières totales

Enfin, lors de nos essais, un facteur d'émission moyen en poussières totales de 8,5 g/kg sur brut a été établi (13,0 g/kg sur brut pour le feu avec une proportion importante de feuilles, 4,0 g/kg pour le feu avec une proportion importante de branches).

En simulant des feux de jardin (herbes, feuilles, petites branches relativement sèches : 7 à 12 % d'humidité), Kannan et al. 2005 obtient également un facteur d'émission moyen en poussières totales comparable de 8,9 g/kg sur brut avec des valeurs allant de 1,5 à 32,3 g/kg sur brut.

La très grande majorité des poussières a une granulométrie inférieure à 2,5 µm (93 % selon Lutes et al. 1996).

## **6.3.2 RESIDUS AGRICOLES**

### ❖ Généralités

Les résidus des céréales tels que la paille sont souvent brûlés en plein champ après récolte afin d'accélérer la rotation des cultures et détruire les nuisibles présents dans les plantes. Cette pratique génère également d'importantes quantités de polluants compte tenu des grandes surfaces généralement impliquées et est donc susceptible de conduire significativement à la dégradation de la qualité de l'air au niveau local. Les fumées émises peuvent en outre gêner la visibilité.

### ❖ Composition et particularités des feux de résidus agricoles

Divers résidus de céréales tels que le blé, l'orge et le maïs sont susceptibles d'être brûlés sur le territoire français. La teneur en humidité de ces résidus de céréales est de l'ordre de 7 à 9 % (Dhammapala et al. 2006, Jenkins et al. 1996). Ces feux présentent la particularité de se diffuser latéralement de plante en plante. Cette pratique génère d'importantes fumées au niveau du front de flamme (combustion vive). A l'arrière de celui-ci, de plus faibles quantités de fumées sont libérées (combustion lente).

#### ❖ Emission de polluants :

Nous n'avons pas procédé à des essais pour ce type de brûlage, les données de la littérature ayant été jugées plus représentatives que celles issues d'un brûlage en tas.

Les publications traitant de la simulation de ces brûlages sont abondantes dans la littérature internationale.

#### HAP

Les HAP les plus abondants dans les émissions des brûlages de résidus agricoles sont le naphthalène, l'acénaphthylène et le phénanthrène. Les teneurs en HAP sont comprises entre 1034 et 8166 µg/kg sur brut pour 8 éléments dosés.

#### Dioxines et furanes

En ce qui concerne les dioxines et furanes, Gullett et al. 2003 a déterminé un facteur d'émission de 0,46 ng TEQ/kg sur brut lors d'un brûlage de pailles de blé.

Dans le cadre du Programme Environnement des Nations Unies (UNEP), un facteur d'émission de dioxines et furanes de 0,5 ng TEQ/kg sur brut a été proposé (Black et al. 2010 - données compilées). Costner et al. 2005, qui a rassemblé des données de la littérature proposait une valeur similaire : 0,5 à 0,8 ng TEQ/kg sur brut.

#### Poussières fines (PM2.5)

Ces pratiques peuvent conduire à une augmentation significative en particules fines (PM2.5) dans l'air ambiant et donc avoir un impact local conséquent (Estrellan et al. 2010). Des teneurs moyennes en PM2.5 de 67,9 µg/m<sup>3</sup> ont par exemple été observées lors de période de brûlage de biomasse en Corée à comparer à des teneurs de 35,6 µg/m<sup>3</sup> en période normale sans brûlage (Ryu et al. 2007). Une concentration ponctuelle de 110,3 µg/m<sup>3</sup> a même été enregistrée lors de la période de brûlage. Des observations similaires ont été faites à Taiwan avec des teneurs en PM2.5 mesurées de 123,6 µg/m<sup>3</sup> lors de période de brûlage de résidus agricoles (paille de riz) et de 32,6 µg/m<sup>3</sup> hors période de brûlage, (Cheng et al. 2009) ainsi qu'en Inde avec des teneurs en PM2.5 mesurées de 320 µg/m<sup>3</sup> lors de période de brûlage de paille de blé et de 103 µg/m<sup>3</sup> hors période de brûlage (Sahai et al. 2007). Ces brûlages participent également à une augmentation des PM10 mais dans une moindre mesure.

#### Poussières totales

Les émissions de poussières sont très homogènes d'une publication à une autre (Andreae et al. 2001, Hays et al. 2005, Jenkins et al. 1996, Li et al. 2007, Schaaf 2003). Elles sont comprises entre 2,7 et 6,9 g/kg sur brut avec une valeur moyenne de 4,7 g/kg sur brut. Ces valeurs prennent en compte des brûlages de pailles de blé, d'orge et de maïs. 93 % des particules ont un diamètre inférieur à 1 µm (PM1 - Li et al. 2007).

### 6.3.3 ECOBUAGE ET FEUX DE FORET

#### ❖ Généralités

L'écobuage est une pratique ancestrale de brûlis qui permet d'éliminer les broussailles et les végétaux secs afin de faciliter la pousse des plantes herbacées. Il est pratiqué à l'automne et au printemps dans les zones montagneuses, escarpées et inaccessibles. De manière plus contrôlée, cette pratique est également utilisée pour réduire la biomasse disponible et prévenir les risques d'incendies en été.

Les feux de forêt peuvent se produire de manière accidentelle, criminelle ou naturelle par le biais de la foudre.

#### ❖ Composition des résidus agricoles et caractéristique des feux

Comme les feux de résidus agricoles, ces feux progressent rapidement avec une combustion vive au niveau du front de flamme et une combustion plus lente à l'arrière de ce front.

#### ❖ Emission de polluants

Des essais de simulation de feux de forêts ont été menés par l'INERIS en 2004 (Collet 2004).

Un certain nombre d'études a été réalisé sur les émissions des feux de forêts et de pâturages avec une représentativité plus ou moins bonne, certaines valeurs proposées provenant par exemple d'essais menés en foyers domestiques. Il est donc important de ne retenir que les plus représentatives.

#### CO, COVT, NO<sub>x</sub>

L'humidité des végétaux joue un rôle très important sur les émissions de polluants. En effet, en comparant la combustion de végétaux provenant de plusieurs sites différents, il a été démontré que, plus l'humidité des végétaux est faible, plus les teneurs en CO et COVT sont faibles et plus la teneur en NO<sub>x</sub> est élevée. (Collet 2004).

Des expérimentations sur des parcelles de forêts amazoniennes ont été menées par Soares Neto et al. 2009. Elles mettent en évidence l'influence du type de combustion sur les émissions de polluants avec des valeurs en CO qui évoluent de 56 g/kg sur brut pour une combustion vive à 146 g/kg sur brut pour une combustion lente. Les émissions de CO, de CH<sub>4</sub> et de COV (comprenant 2 à 3 atomes de carbone) sont bien corrélées tandis que les émissions de poussières fines sont inversement corrélées aux émissions de CO. Ce phénomène pourrait être lié à la non prise en compte des espèces organiques semi-volatiles dans les émissions de poussières.

## HAP

Concernant les HAP, les facteurs d'émission proposés proviennent d'une étude, menée par l'INERIS en 2004, avec divers végétaux prélevés dans le sud est et dans le sud ouest de la France qui met en évidence des teneurs en HAP de : 10508 µg/kg sur brut pour les 8 HAP dosés (Collet 2004). Notons que des brûlages de divers conifères (pins) mettent en évidence des facteurs d'émission plus faibles : 736 µg/kg sur brut (Bhargava et al. 2002) et 1374 µg/kg sur brut (Jenkins et al. 1996). Ces résultats ne sont pas incohérents, la première étude simulant plutôt des feux mal aérés du fait de la présence de mousses, de litières et d'aiguilles de pin qui étouffent le feu, la seconde et la troisième des feux plus vifs avec uniquement la présence de branches d'arbres d'humidités assez faibles (25 à 35 %).

## Dioxines-Furanes

En ce qui concerne les dioxines et furanes, une révision des facteurs d'émission utilisés par le Programme Environnement des Nations Unies (UNEP) a été proposée par Black et al. 2010 qui ont compilé les données provenant de plusieurs études (Collet et al. 2007, Gullett et al. 2003 et 2006, Meyer et al. 2004 et 2009). Pour les feux de forêts et les feux de pâturages, les facteurs d'émission suivants ont, respectivement été proposés : 1,0 et 0,5 ng TEQ/kg sur brut. Costner et al. 2005 qui ont également rassemblé des données de la littérature proposaient une valeur similaire : pour ces deux types de feux, comprises entre 0,125 et 0,5 ng TEQ/kg sur brut.

## Poussières totales

Les émissions de poussières en g/kg sur brut sont assez homogènes d'un auteur à l'autre, allant de 1,9 (Alves et al. 2010 - forêts de type méditerranéenne) à 12,2 (Soares Neto et al 2009 – forêt amazonienne), avec 6,1 et 7,5 pour des données compilées respectivement par Janhäll et al. 2010 et Andreae et al. 2001 (forêt tempérée). La valeur moyenne en poussières, pour les feux de forêt, est de 6,9 g/kg sur brut.

Les émissions des feux de pâturages sont assez similaires avec des valeurs de 2,8 (Janhäll et al. 2010), 3,0 (Andreae et al. 2001) et 11,0 g/kg sur brut (Dhammapala et al. 2007) et une valeur moyenne de 5,6 g/kg sur brut.

### **6.3.4 COUPES D'ARBRES FRUITIERS**

#### ❖ Généralités

Les branches issues de la taille des arbres fruitiers sont souvent éliminées par brûlage en tas.

#### ❖ Composition et particularités de ces feux

Les arbres fruitiers sont régulièrement traités pour éliminer insectes et champignons et sont donc contaminés par divers agents chimiques, au moins en surface. Contrairement aux biomasses précédentes, le brûlage de ces branchages s'effectue en tas.

#### ❖ Emission de polluants

Pour simuler ces brûlages, nous avons procédé à un essai.

##### HAP

Les résultats en HAP de la littérature, compris entre 704 et 3068 µg/kg sur brut sont similaires à ceux obtenus lors de notre étude (1407 µg/kg sur brut pour 8 éléments dosés). Les facteurs d'émission les plus faibles sont obtenus sur les échantillons les plus secs.

##### Dioxines et furanes

Comme pour les autres biomasses naturelles, les émissions de dioxines et furanes sont faibles 0,134 µg TEQ/kg sur brut, avec des émissions de PCB similaires à celles des dioxines : 0,131 µg TEQ/kg sur brut.

##### Poussières fines et poussières totales

En ce qui concerne les émissions de poussières totales, un facteur d'émission de 3,8 g/kg sur brut a été obtenu. Cette valeur est similaire à celles obtenues par Jenkins et al. 1996 et par Keshtkar et al. 2006, qui obtiennent respectivement 3,7 et 4,8 g/kg sur brut (en PM2.5). 93 % des particules ont un diamètre inférieur à 2,5 µm (Jenkins et al. 1996).

### **6.3.5 PNEUMATIQUES**

#### ❖ Généralités

Même si le brûlage à l'air libre des pneus usagés est strictement interdit, des brûlages accidentels dans des lieux de stockage intermédiaires ou intentionnels sont malheureusement encore constatés. Par ailleurs, de nombreux véhicules, environ 40 000, contenant également ces matériaux sont également brûlés chaque année, là encore de manière accidentelle ou intentionnelle.

Les feux de pneus sont difficilement maîtrisables et à l'origine d'émissions de fumées noires très abondantes.

#### ❖ Composition

Les pneus de véhicule léger sont constitués essentiellement de caoutchouc synthétique, de noir de carbone, de tringles d'acier, de textile et d'additifs.

Le pourcentage en matières volatiles est assez élevé (en moyenne 66 %) et l'humidité faible (< 2 %). Les pneus contiennent du soufre mais peu de chlore.

#### ❖ Emissions de polluants

Quelques études, notamment aux Etats Unis, ont été menées afin de déterminer les émissions de polluants lors d'un brûlage à l'air libre de pneumatiques (Lemieux et al. 1993, Ryan et al. 1989).

Les résultats de l'ensemble des essais sont assez concordants. Ils mettent en évidence des émissions relativement fortes de monoxyde de carbone, de poussières, de composés organiques volatils, notamment de benzène (1520 et 2180 mg/kg) et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, compris entre 85 et 174 mg/kg pour le benzo(a)pyrène par exemple, tandis que les facteurs d'émission en métaux restent assez faibles à l'exception du zinc (31 et 45 mg/kg Lemieux et al. 1993 et Ryan et al. 1989).

En ce concerne les poussières, le facteur d'émission (119 g/kg sur brut) déterminé par Lemieux et al. 2004 est du même ordre de grandeur que celui obtenu lors de nos essais (83,3 g/kg sur brut). Rappelons que le résultat de notre essai a été obtenu sur une période très courte du fait du colmatage de notre filtre de prélèvement. Il est donc assorti d'une incertitude importante.

Les émissions de SO<sub>2</sub> sont élevées : 8,8 g/kg (valeur également obtenue sur une courte période).

### 6.3.6 CABLES ELECTRIQUES

#### ❖ Généralités

Afin de récupérer leur âme de cuivre, les câbles électriques sont fréquemment brûlés illicitement. Il s'agit en général de petits lots provenant de véhicules, de construction de bâtiments ou de déchets de démolition.

#### ❖ Caractéristiques

Dans les bâtiments, deux types de câbles électriques sont présents : les câbles d'énergie et de télécommunication.

Les câbles d'énergie qu'ils soient domestiques ou industriels sont, dans les cas les plus courants, isolés et gainés avec les mêmes types de polymères pour une meilleure résistance à l'échauffement (PVC, élastomère réticulé/caoutchouc nitrile, acrylique vulcanisé, caoutchouc/néoprène, etc.). Pour les câbles de télécommunication, les gaines assurent une résistance au feu et aux agressions chimiques. Elles sont constituées notamment de PVC et de polyéthylène. Afin d'améliorer certaines caractéristiques de ces câbles, divers additifs sont également utilisés tels que des retardateurs de flamme, des plastifiants, etc.

#### ❖ Emissions de polluants

Contrairement à l'ensemble des autres essais, les brûlages de câbles électriques ont été réalisés dans un petit calorimètre avec une charge de matière de l'ordre de 500 grammes. Le facteur d'émission moyen (pour des essais effectués avec des câbles en PVC et en caoutchouc) obtenu s'élève à environ 950 µg I.TEQ/kg (Adam 1999). Cette valeur pourrait toutefois être surestimée car ces essais ont été réalisés sur une installation (calorimètre) qui a pu maintenir les fumées trop longtemps dans une plage de température favorisant la formation de ces polluants.

Néanmoins, compte tenu des caractéristiques de ces matériaux, les facteurs d'émission resteront élevés, voire très élevés. Le brûlage de câbles électriques génère d'importantes émissions de dioxines et furanes du fait de la présence de métaux et notamment du cuivre, élément connu pour catalyser la formation de ces polluants.

Des essais mériteraient toutefois d'être refaits afin d'actualiser cette valeur.

Peu de données sont disponibles dans la littérature pour ce type de brûlage, même si la récupération du cuivre par brûlage semble également être une pratique courante à l'étranger. Notons que Bremmer et al. 1994, qui ont réalisé des brûlages de ces matériaux, propose un facteur d'émission de 500 µg TEQ/kg.

### 6.3.7 BOIS DE DEMOLITION

#### ❖ Généralités

Il s'agit de bois usagés provenant d'une structure de bâtiment (charpentes, fenêtres, portes, parquets, etc.), de vieux meubles ou de bois ayant servi lors de la construction ou rénovation de bâtiments (bois de coffrage) ou d'emballages. Ces déchets contiennent donc des bois traités par des agents chimiques protecteurs ou des produits de finitions (peintures) mais aussi des bois non traités. De part la diversité des adjuvants utilisés et de leurs teneurs (certains traitements ont pu être effectués en profondeur), ces bois sont à l'heure actuelle difficilement valorisables. Afin de réduire les quantités de déchets à éliminer, ces bois sont souvent éliminés par brûlage sur les chantiers de démolition ou de rénovation de bâtiments.

#### ❖ Caractéristiques et composition des bois de démolition

La nature et les quantités de produits utilisées pour le traitement du bois sont très variées. Ces traitements peuvent influencer la nature et les quantités de polluants émis lors de la combustion.

Les bois de démolition peuvent être composé de :

- bois peints, imprégnés,
- bois combustibles, incluant les bois non-peints et non imprégnés tels que les bois brut de coffrage,
- bois faiblement adjuvantés : les contreplaqués, les panneaux de particules,
- éléments métalliques non combustibles tel que les clous, les vis, les ferrures, etc.
- autres matériaux qui se sont mal séparés lors de la démolition tels que des isolants, des plastiques, des papiers peints, etc.

Lors des feux de chantiers, d'autres matériaux issus des bâtiments à démolir ou apportés par les entreprises intervenantes sont également susceptibles d'être brûlés tels que des papiers, des cartons, des emballages plastiques, des câbles électriques, etc. Ces matériaux peuvent également engendrer de fortes émissions de polluants.

Parmi les produits de traitements du bois utilisés par le passé et potentiellement présents dans les bois de démolition, un grand nombre de produits organochlorés ou contenant des métaux lourds sont recensés. Ils peuvent, lors d'un processus de combustion, être à l'origine d'émissions à l'atmosphère de dioxines/furanes, de PCBs ou de métaux lourds.

#### ❖ Emissions de polluants

Il est surprenant de ne trouver aucune publication traitant du brûlage à l'air libre de bois de démolition dans la littérature internationale alors qu'un grand nombre de publications est recensé sur divers brûlage de déchets à l'air libre. Ces pratiques n'ont-elles pas lieu à l'étranger ?

Issus d'un centre de récupération de déchets de chantier, les bois de démolition utilisés pour nos essais, étaient composés en grande majorité de bois peints et vernis, de panneaux de particules et de bois de coffrage. Un tri visuel a été réalisé, afin de séparer les bois non traités tels que les bois de coffrage ou les bois faiblement traités tels que les panneaux de particules, des bois plus fortement adjuvantés tels que les bois peints et vernis. Deux essais ont été effectués avec ces deux types de bois.

### Dioxines et furanes

Avec un facteur d'émission de 53,4 ng TEQ/kg sur brut, la combustion de bois peint et vernis est fortement émettrice de dioxines et furanes. Cette concentration est considérablement supérieure à celles des bois non ou faiblement adjuvantés (0,75 ng TEQ/kg). Cette plus forte teneur en dioxines et furanes est obtenue malgré une teneur en acide chlorhydrique émise très voisine lors des deux essais de combustion. Le facteur d'émission en acide chlorhydrique, de l'ordre de 30 mg/kg de bois brûlé, est à peine supérieur à ceux des bois naturels (4 à 22 mg/kg).

Ces émissions élevées en dioxines et furanes s'expliquent probablement par la présence de composés organochlorés tel que, par exemple, le pentachlorophénol (PCP); produit connu pour être un précurseur des dioxines qui a été largement employé pour le traitement des bois utilisés dans les bâtiments par le passé (Pohlandt et al. 1995) mais qui n'apporte qu'une faible masse de chlore par rapport à la quantité de chlore présente naturellement dans le bois.

Ces résultats mettent en évidence qu'un tri visuel pour séparer les bois contaminés des autres est suffisant pour éviter la formation des dioxines en quantité lors de la combustion.

Enfin, un troisième essai a été effectué avec des déchets de bois de démolition fortement adjuvantés (contenant des composés organohalogénés) provenant d'un autre centre de récupération de déchets. Contrairement aux autres essais, d'autres matériaux étaient présents en petite quantité avec le bois. Le facteur d'émission déterminé, lors de cet essai, est particulièrement élevé : 1586 ng TEQ/kg sur brut.

### Métaux

En ce qui concerne les bois peints et vernis, les produits de finitions utilisés par le passé dans ces bois contiennent de nombreux pigments métalliques qui sont à l'origine d'émissions de métaux, notamment de plomb et de zinc. Les oxydes de plomb et de zinc sont longtemps entrés dans la formulation des peintures blanches. Bien que plus faibles que les facteurs d'émission des bois peints et vernis, les facteurs d'émission des bois non ou faiblement adjuvantés sont encore relativement élevés ce qui montre, pour ces polluants, la moindre efficacité d'un tri visuel que pour les dioxines. Il est vrai que le tri visuel est rendu délicat par le vieillissement des peintures dont la couleur s'estompe au fil du temps, notamment lorsque ces bois ont séjourné en extérieur.

Ces essais mettent en évidence le caractère particulièrement nocif de ces feux qui sont susceptibles d'occasionner des pollutions de l'air et des sols localement fortes.

### 6.3.8 TRAVERSES DE CHEMINS DE FER, BOIS CREOSOTES ET TRAITES CCA

#### ❖ Généralités

Les traverses de chemin de fer ont longtemps été dispersées chez les particuliers qui les ont utilisées dans l'aménagement des jardins notamment. Depuis peu, ces produits sont considérés comme des déchets spéciaux et ne peuvent plus être mis à disposition des particuliers. L'élimination de ces produits devrait donc être effectuée dans une filière sûre. Cependant de nombreux particuliers en disposent. Ces déchets sont donc susceptibles, à un moment donné, de faire l'objet d'un brûlage à l'air libre ou de terminer leur vie dans un foyer domestique.

D'autres traitements de préservation tels que les sels CCA (cuivre, chrome, arsenic) ou CCB (cuivre, chrome, bore) sont également utilisés pour protéger les bois utilisés en extérieur (partie aérienne de certains poteaux téléphoniques par exemple) contre l'attaque des insectes et des champignons.

#### ❖ Caractéristiques et composition des traverses

Fabriqués à partir de bois nobles, notamment du chêne, les traverses sont imprégnées en autoclave de produits fongicides et insecticides contenant de la créosote en vue d'allonger leur durée de vie et de les protéger des intempéries. Obtenue à partir de la carbonisation de la houille, la créosote contient plus de 200 composés dont 85 % de HAP, 10 % de composés phénoliques et 5 % d'hétérocycliques aminés, soufrés ou oxygénés. Elle possède des propriétés toxiques de par (entre autres) sa forte teneur en benzo(a)pyrène ; produit considéré comme cancérigène.

Même si une partie de la créosote s'est disséminée dans différents milieux durant le cycle de vie des traverses, les concentrations en HAP dans les rebuts de traverses sont encore importantes.

L'analyse élémentaire des traverses fait apparaître un pourcentage de carbone et de soufre supérieur à celui du bois naturel (56 versus 50 % pour le carbone dans le bois naturel, 8 versus < 0,05 % de soufre dans le bois naturel).

#### ❖ Emissions de polluants

Tout comme pour les bois de démolition, il n'y a pas de données dans la littérature internationale relative au brûlage à l'air libre de ces déchets. Cette pratique étant a priori peu répandue.

#### HAP

Néanmoins, une étude du comportement du bois traité à la créosote par décomposition thermique a été menée par Becker et al. 2001. Les composés majoritairement émis sont les HAP en particulier les fluoranthène, phénanthrène, et pyrène. Les composés soufrés initialement présents dans les traverses n'ont pas été mis en évidence à l'émission lors de ces essais.

Dans le cadre de notre étude, les résultats obtenus lors du brûlage de traverses sont finalement assez comparables à ceux obtenus lors de la combustion de bois naturels pour l'ensemble des polluants recherchés à l'exception des HAP et des COV. Les HAP sont présents en quantité importante, 5 à 10 fois plus que lors de la combustion de bois naturels. Ces composés, initialement présents dans la créosote, se volatilisent très probablement lors de la montée en température des traverses et ne sont pas dégradés thermiquement du fait de la piètre qualité de la combustion.

### Métaux

Pour les bois traités CCA, Wasson et al. 2005 mentionne que 11 à 14% de l'As présent initialement dans le bois est émis lors d'un brûlage. Ce pourcentage est plus faible pour le Cr et le Cu (moins de 1%). La température de combustion, comprise entre 600 et 800°C est trop faible pour volatiliser ces deux derniers éléments. Les facteurs d'émission obtenus sont les suivants : 214, 15,1 et 10,6 mg/kg de bois brûlé respectivement pour l'As, le Cr et le Cu.

En ce qui concerne les dioxines et furanes, un facteur d'émission de 1,85 ng TEQ/kg est obtenu.

## **6.4 SYNTHÈSE DES RESULTATS PAR POLLUANT**

### **6.4.1 PRINCIPAUX GAZ DE COMBUSTION : O<sub>2</sub> - CO – NO<sub>x</sub> - COVT**

Lors de nos essais, une importante dilution des fumées est constatée comme lors d'un brûlage à l'air libre. La teneur en oxygène mesurée à l'émission des divers feux réalisés est comprise entre 20,5 et 20,9% à l'exception du brûlage de pneus, 20,1%, dont la combustion est extrêmement rapide.

Signe d'une combustion incomplète, les facteurs d'émission en monoxyde de carbone sont relativement élevés lors d'un brûlage à l'air libre.

Malgré les allures de combustion et les humidités différentes de tous ces matériaux testés, le facteur d'émission de CO évolue finalement peu lors de nos essais. Les déchets de bois ont des facteurs d'émission assez similaires à ceux du bois naturel (pins) ayant une humidité de l'ordre de 30%. Les pneus sont à l'origine de plus fortes émissions de CO.

Biomasses et déchets brûlés	Facteurs d'émission déterminés	Facteurs d'émission de la littérature
Bois faiblement adjuvantés	56,2	-
Bois peints et vernis	34,4	-
Bois fortement adjuvantés	57,4	-
Pneus	88,3	-
Traverses	50,6	-
Bois naturels humides (30%)		36,4 <sup>3</sup>
Branches	40,1	18 <sup>1</sup>
Feuilles	44,7	
Forêt landaise	81,4	
Forêt méditerranéenne	63,7	
Forêt extratropicale		58,9 <sup>2</sup> - 36,4 <sup>3</sup> - 70,8 <sup>4</sup>
Ecobuage		51,8 <sup>5</sup>
Coupes d'arbres fruitiers	40,5	45,4 <sup>3</sup>
Résidus agricoles		69 (26 à 128) <sup>6</sup>

1 : Lutes et al. 1996 (déchets verts)

2 : Andrae et al. 2001 (compilation de données – valeur en équivalent NO estimée avec une humidité de 45%)

3 : Jenkins et al. 1996

4 : Soares Neto et al. 2009 (forêt tropicale)

5 : Dhammapala et al. 2007 (herbes sèches à 9% d'humidité)

6 : valeur moyenne (fourchette de valeurs) ; Andrae et al. 2001, Dhammapala et al. 2007, Jenkins et al. 1996, Li et al. 2007, Ortiz de Zarate et al. 2000, Sahai et al. 2007, Schaaf et al 2003, Zhang et al. 2008

*Tableau 1 : facteurs d'émission de CO<sub>2</sub> en g/kg sur brut, lors du brûlage à l'air libre de divers déchets et biomasses*

Biomasses et déchets brûlés	Facteurs d'émission déterminés	Facteurs d'émission de la littérature
Bois faiblement adjuvantés	9,7	-
Bois peints et vernis	3,3	-
Bois fortement adjuvantés	7,6	-
Pneus	11,9	-
Traverses	24,4	-
Bois naturels humides (30%)		3,8 <sup>1</sup>
Branches	9,1	9,7 <sup>2</sup>
Feuilles	16,7	
Forêt landaise	29,0	
Forêt méditerranéenne	19,0	
Ecobuage		10,7 <sup>3</sup>
Coupes d'arbres fruitiers	4,3	6,3 <sup>1</sup>
Résidus agricoles		2,2 <sup>4</sup> - 6,4 <sup>1</sup>

1 : Jenkins et al. 1996

2 : Lutes et al. 1996 (déchets verts)

3 : Dhammapala et al. 2006 (herbes sèches à 9% d'humidité)

4 : Dhammapala et al. 2006

*Tableau 2 : facteurs d'émission de COVT, en g équivalent C/kg sur brut, lors du brûlage à l'air libre de divers déchets et biomasses*

Les plus fortes émissions sont constatées lorsque la biomasse brûle mal, essentiellement par manque d'oxygène (feux couvants) : cas des simulations des feux de forêts et du brûlage de feuilles. De fortes émissions sont également observées lors du brûlage de traverses. Elles pourraient provenir de la volatilisation des espèces organiques les plus légères de la créosote présente dans ce déchet. En ce qui concerne le brûlage à l'air libre des pneus, la combustion rapide et incomplète favorise la formation de CO et de COV.

Les NO<sub>x</sub> se forment par oxydation de l'azote de l'air et dans une moindre mesure de l'azote présent dans le combustible. Ces émissions sont favorisées par des températures de combustion élevées ce qui n'est pas le cas des brûlages à l'air libre.

Biomasses et déchets brûlés	Facteurs d'émission déterminés	Facteurs d'émission de la littérature
Bois faiblement adjuvantés	2,3	-
Bois peints et vernis	4,1	-
Bois fortement adjuvantés	1,5	-
Pneus	2,4	-
Traverses	0,8	-
Bois naturels humides (30%)		1,3 <sup>3</sup>
Branches	1,1	
Feuilles	0,6	
Déchets verts		0,2 <sup>1</sup>
Forêt landaise	1,3	
Forêt méditerranéenne	2,1	
Forêt extratropicale		1,7 <sup>2</sup> -1,3 <sup>3</sup>
Coupes d'arbres fruitiers	2,2	3,4 <sup>3</sup>
Résidus agricoles		2,0 (1,0 à 3,0) <sup>4</sup>

1 : Lutes et al. 1996

2 : Andreae et al. 2001 (compilation de données – valeur en équivalent NO estimée avec une humidité de 45%)

3 : Jenkins et al. 1996

4 : valeur moyenne (fourchette de valeurs) ; Andreae et al. 2001, Jenkins et al. 1996, Li et al. 2007, Ortiz de Zarate et al. 2000, Sahai et al. 2007, Zhang et al. 2008

*Tableau 3 : facteurs d'émission de NO<sub>x</sub>, en g équivalent NO<sub>2</sub>/kg sur brut, lors du brûlage à l'air libre de divers déchets et biomasses*

Des colles contenant de l'azote sont largement utilisées dans l'industrie du bois (pour la fabrication de panneaux de particules par exemple). La présence de tels matériaux pourrait favoriser la formation d'oxydes d'azote. Les facteurs d'émission correspondant aux déchets de bois adjuvantés sont d'ailleurs plutôt plus élevés que ceux de la biomasse. Pour les déchets de bois étudiés, les bois les plus adjuvantés mais également les plus humides (car stockés longtemps en extérieur) sont à l'origine des plus faibles émissions. L'humidité du bois joue donc aussi un rôle important sur les émissions.

En ce qui concerne la biomasse, le brûlage de feuilles est à l'origine des plus faibles émissions d'oxydes d'azote du fait très probablement des faibles températures de combustion (feux couvants). Dans ce cas, les émissions sont essentiellement influencées par la teneur en azote du combustible (Ortiz de Zarate et al. 2000).

Les autres valeurs sont, dans l'ensemble, assez homogènes.

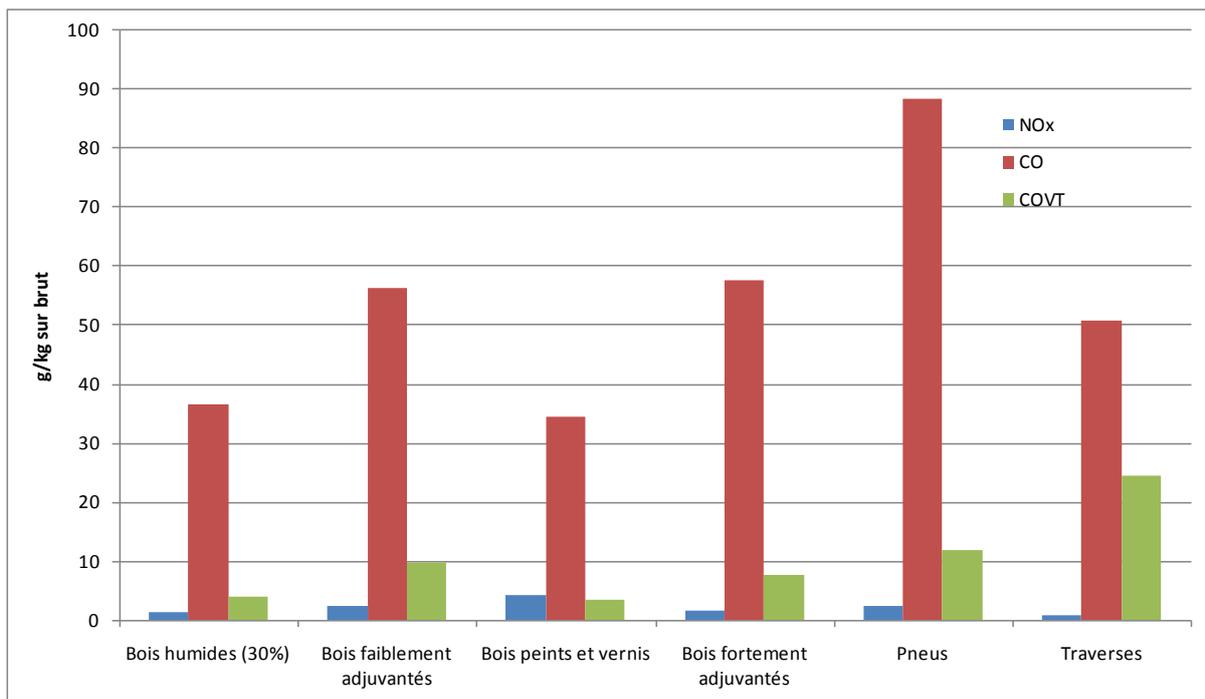


Figure 1 : facteurs d'émission (en g/kg sur brut) des principaux gaz de combustion lors du brûlage à l'air libre de divers déchets (valeurs obtenues lors de nos essais sauf bois humides : donnée de la littérature)

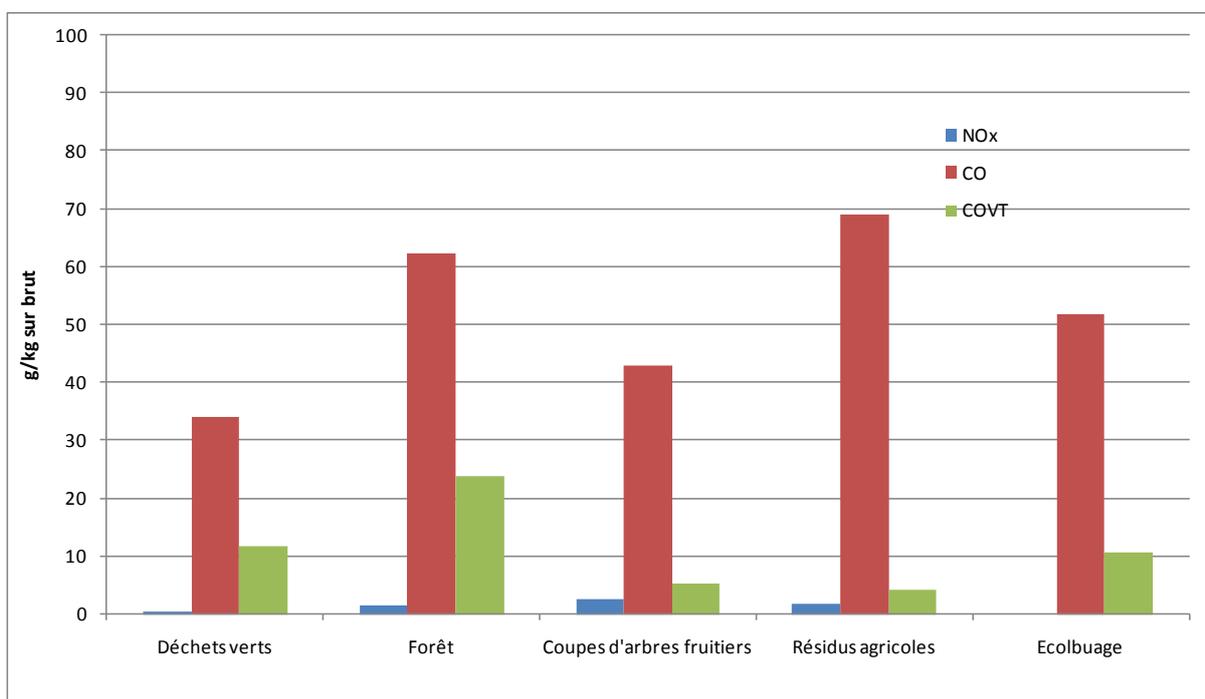


Figure 2 : facteurs d'émission (en g/kg sur brut) des principaux gaz de combustion lors du brûlage à l'air libre de diverses biomasses (valeurs moyennes de l'ensemble des données obtenues lors de nos essais et dans la littérature)

## 6.4.2 POUSSIÈRES

Les aérosols issus de brûlage à l'air libre de biomasse sont constitués par des particules solides et des composés organiques présents, en fonction de la température de l'effluent, sous forme gazeuse ou liquide (appelés fraction condensable). La fraction solide est constituée de matières solides minérales, de carbone élémentaire (suie) et de particules solides organiques. La fraction condensable est essentiellement constituée d'espèces organiques de poids moléculaires élevés tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

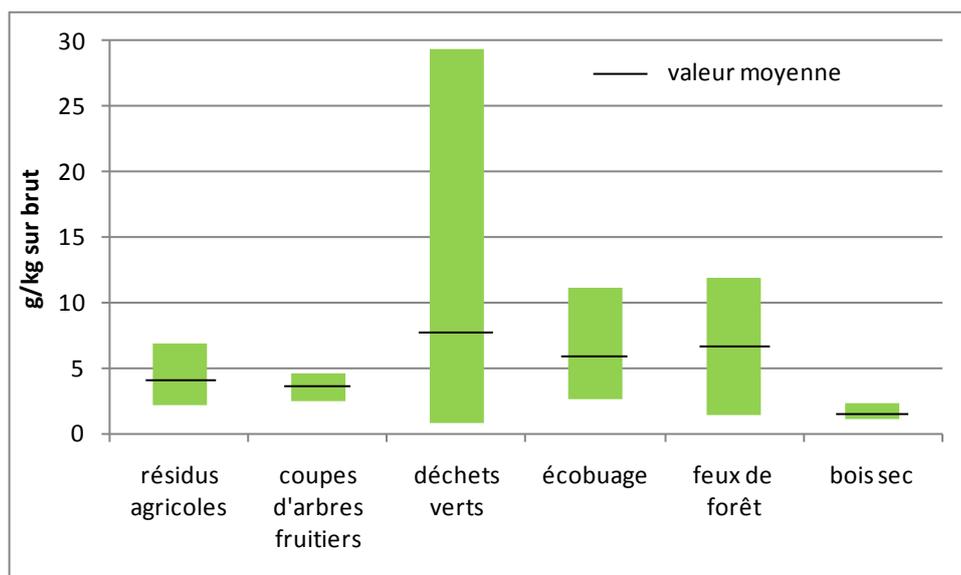
La piètre qualité de la combustion favorise la formation de cette fraction condensable des particules. Cette dernière est largement réduite par l'amélioration des conditions de combustion, ce qui explique la quasi-inexistence de cette fraction sur des installations de combustion de fortes puissances. Les composés organiques présents dans cette fraction se transforment, en grande partie, par condensation, en particules fines lors du refroidissement de l'effluent gazeux à température ambiante et ceux malgré la dilution de celui-ci. Or souvent les méthodes de mesure employées pour caractériser ces effluents gazeux sont issues de méthodes normalisées utilisées sur les installations industrielles qui ne prennent pas en compte cette fraction condensable. Dans certains cas, les émissions de poussières liées aux brûlages à l'air libre sont donc sous-estimées, notamment lorsqu'un simple filtre maintenu à une température élevée est utilisé. Dans ce cas, les espèces organiques lourdes sont maintenues sous forme gazeuse ou volatilisée, et ne sont donc pas prises en compte. L'impact de ce phénomène pourrait conduire à réévaluer à l'avenir ces facteurs d'émission.

A partir des données obtenues lors de nos essais et des données de la littérature, les facteurs d'émission de PM<sub>2.5</sub> de différentes biomasses ont pu être établis.

Les résultats obtenus pour le brûlage à l'air libre de la biomasse sont relativement homogènes, avec des facteurs d'émission allant de 2 à 8,3 g/kg sur brut malgré l'extrême diversité des biomasses prises en compte : résidus agricoles, coupes d'arbres fruitiers, déchets verts, pâturages, forêts ou encore bois sec.

Les valeurs les plus faibles, de l'ordre de 2,2 g/kg de bois brûlé, sont obtenues lors du brûlage de bois secs. L'humidité du combustible et la qualité de la combustion sont des paramètres qui influencent les émissions de poussières.

Les poussières issues d'un brûlage à l'air libre de biomasse sont essentiellement composées de poussières fines (PM<sub>1</sub> - Alves et al. 2010, Janhäll et al. 2009, Jenkins et al. 1996, Hays et al. 2002, Lutes et al. 1996, Wardoyo 2007). Selon l'humidité du combustible, la qualité de la combustion et le type de biomasse notamment, les particules fines (PM<sub>2.5</sub>) représentent de 80 à 98% en masse des poussières totales. Seul Kannan et al. 2005 obtient une fraction PM<sub>10</sub> majoritaire, ce qui est contradictoire avec les autres publications où les PM<sub>2.5</sub> sont considérés comme étant largement majoritaires. Lors de cette étude menée par Kannan, la détermination de la distribution granulométrique n'a toutefois pas été effectuée in situ mais en différé en laboratoire, ce qui peut-être source de distorsion. Afin d'exprimer les valeurs en PM<sub>2.5</sub>, nous avons considéré que 93% des poussières totales ont une granulométrie inférieure à 2,5 µm (Lutes et al. 1996).



Résidus agricoles : Andreae et al. 2001, Hays et al. 2005, Jenkins et al. 1996, Li et al. 2007, Schaaf 2003

Coupes d'arbres fruitiers : présente étude, Jenkins et al. 1996, Keshtkar et al. 2006

Déchets verts : présente étude, Lutes et al. 1996, Kannan et al. 2005, Hays et al. 2002, Wardoyo 2007

Écobuage : Janhäll et al. 2010, Andreae et al. 2001, Dhammapala et al. 2007

Feux de forêt : Alves et al. 2010, Andreae et al. 2001, Janhäll et al. 2010, Soares Neto et al. 2009

Bois sec : présente étude

Figure 3 : émissions de PM2.5 lors du brûlage à l'air libre de différentes biomasses

Le brûlage à l'air libre de pneus est une combustion visuellement très fumigène. En termes de facteurs d'émission cela se traduit par des valeurs environ 50 fois plus élevées que celles correspondant aux brûlages à l'air libre de bois secs. Lors de cette étude, un facteur d'émission en poussières totales de 83,3 g/kg a été établi. Lemieux et al. 2004 a déterminé un facteur d'émission en poussières totales de 119,0 g/kg.

### 6.4.3 DIOXINES-FURANES – PCB

La détermination de facteurs d'émission de dioxines et furanes est sûrement plus complexe que celles d'autres polluants. Les dioxines et furanes se forment dans une plage de température allant de 250 à 400°C environ. Une bonne simulation nécessite donc un temps de passage des fumées dans cette plage comparables à celui d'un brûlage à l'air libre.

Concernant le brûlage de la biomasse à l'air libre, un travail de compilation des données de la littérature a été effectué par Black et al. 2010. Ces données comprennent des résultats d'essais menés à l'INERIS portant sur les feux de forêts (Collet et al. 2007).

Il a conduit à une proposition de révision des facteurs d'émission de l'outil spécialisé pour l'identification et la quantification des dioxines et furanes du Programme des Nations Unies sur l'Environnement (UNEP Toolkit). Black et al. 2010 propose les valeurs suivantes :

- 0,5 ng TEQ/kg sur brut pour les résidus agricoles,
- 1,0 ng TEQ /kg sur brut pour les feux de forêts,
- et 0,5 ng TEQ/kg sur brut pour l'écobuage.

Costner et al. 2005, qui a également rassemblé des données de la littérature proposait une fourchette de valeurs similaire pour l'écobuage et les feux de forêt, de 0,125 à 0,5 ng TEQ/kg sur brut.

Les essais menés à l'INERIS mettent en évidence des facteurs d'émission pour les déchets verts (0,09 et 0,17 ng TEQ/kg branches et feuilles respectivement) et pour les coupes d'arbres fruitiers (0,13 ng TEQ/kg) très faibles, plutôt dans le bas de la fourchette de facteurs d'émission proposés par Black et al. 2010 et similaires à ceux proposés par Costner et al. 2005. Les teneurs de certains congénères de dioxines et furanes sont inférieures aux limites de quantification analytiques. Ces résultats mettent en évidence que la combustion de la biomasse naturelle n'est pas une source importante de dioxines et furanes.

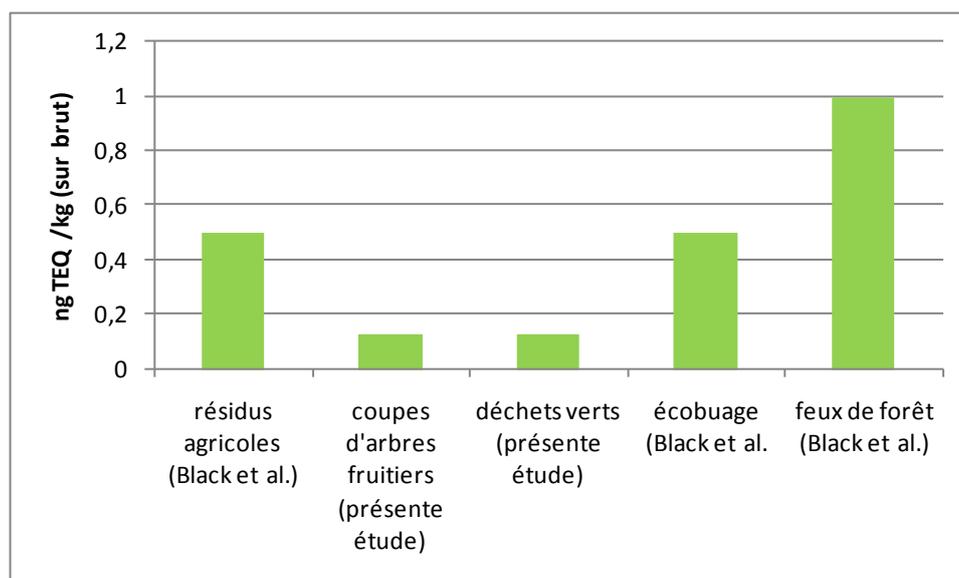


Figure 4 : émissions de dioxines et furanes lors du brûlage à l'air libre de différentes biomasses naturelles (compilation de données : présente étude et littérature)

Lors de ces essais, des facteurs d'émission en PCB de 0,01, 0,10 et 0,13 ng TEQ/kg ont respectivement été déterminés pour les branches, les feuilles (déchets verts) et les branches d'arbres fruitiers. Les PCB représentent alors respectivement 12, 38 et 49% des émissions en équivalent toxique.

En ce qui concerne les déchets, avec un facteur d'émission de 1586 ng TEQ/kg, la combustion de bois fortement adjuvantés est très fortement émettrice de dioxines et furanes. Cette valeur, considérablement supérieure à celles des bois peints et vernis et des bois de récupération faiblement adjuvantés, s'explique par la présence de composés organochlorés contenus dans les produits de traitement tel que le pentachlorophénol, produit largement utilisé par le passé. Ces résultats mettent également en évidence qu'un tri visuel des déchets peut être suffisant afin de minimiser la formation de ces polluants.

La combustion de câbles électriques est également à l'origine d'importantes émissions de dioxines et furanes avec un facteur d'émission de 950 ng I.TEQ/kg. La présence de matériaux plastiques contenant du chlore tel que le PVC et de cuivre favorise la formation de ces polluants. Notons toutefois que ce facteur d'émission, assez ancien (Adam 1999) a été établi sur un pilote qui de part ses caractéristiques, a pu favoriser la formation de ces polluants par un maintien trop long des effluents gazeux dans une plage de température favorisant la formation de ces polluants. Ces facteurs d'émission mériteraient donc d'être revus.

Dans le cadre de nos essais, les facteurs d'émission liés à la combustion à l'air libre de traverses sont sensiblement identiques à ceux obtenus lors de la combustion de bois de démolition peu adjuvantés mais supérieurs à ceux de la combustion de la biomasse naturelle (branches et feuilles). Notons que celle-ci est humide contrairement aux traverses et aux bois de démolition.

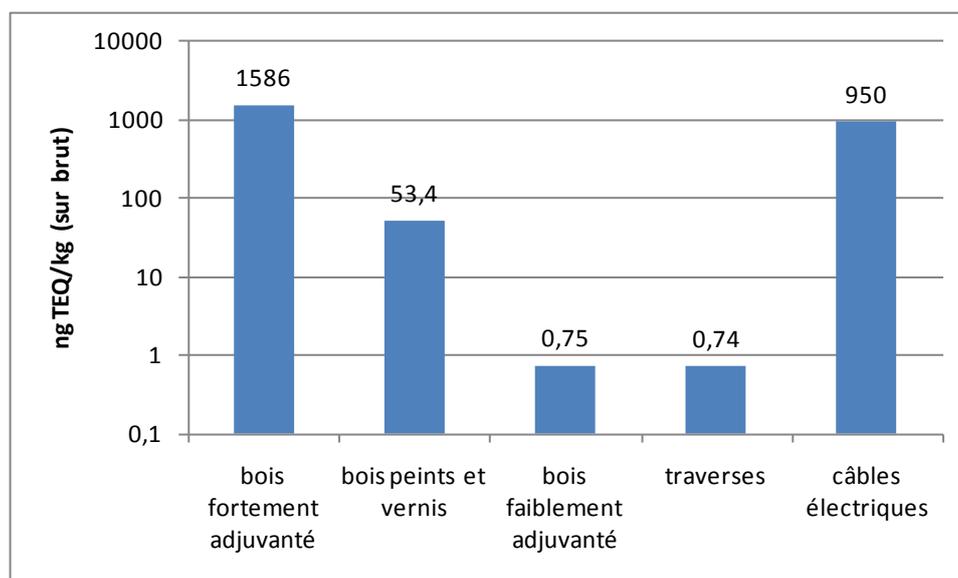


Figure 5 : émissions de dioxines et furanes lors du brûlage à l'air libre de différents déchets

Sur la base des essais réalisés et des données de la littérature, les facteurs d'émissions de dioxines et furanes varient considérablement d'un déchet à un autre mais sont relativement faibles et homogènes pour la combustion de la biomasse naturelle, ce qui montre que la composition chimique du matériau joue un rôle déterminant et la qualité de la combustion un rôle secondaire.

Les émissions de PCB suivent dans l'ensemble l'évolution des émissions de dioxines et furanes, avec comme pour ces derniers polluants, un fort facteur d'émission pour les bois fortement adjuvantés et les bois peints et vernis. Les valeurs des facteurs d'émission de PCB sont de l'ordre de 1 à 15% de la valeur du facteur d'émission global (dioxines, furanes et PCB) pour ces déchets.

Déchets brûlés	Facteurs d'émission en ng TEQ/kg (sur brut)			
	Dioxines	Furanes	Somme PCDD/DF	PCB
Bois fortement adjuvantés	46	1540	1586	257
Bois peints et vernis	48,0	15,4	53,4	0,70
Bois faiblement adjuvantés	0,44	0,31	0,75	0,14
Traverses	0,41	0,33	0,74	0,03

Tableau 4 : répartition des émissions de dioxines, furanes et PCB lors du brûlage à l'air libre de différents déchets

#### 6.4.4 HAP

Lors d'une combustion de biomasse à l'air libre, les HAP sont essentiellement adsorbés sur des particules de tailles inférieures à 1 µm, en particulier les composés comprenant plus de 4 noyaux aromatiques qui se forment lors des ultimes étapes de la combustion. Les composés les plus abondants (2 méthyl-naphtalène, naphtalène, et phénanthrène notamment), comprenant 2 à 4 noyaux aromatiques ont tendance à se former sur des particules plus grosses lors du refroidissement des fumées (Keshtkar et al. 2007). Ces HAP considérés comme relativement légers, ne sont pas les plus nocifs, à l'exception du naphtalène (classé en groupe 2B par l'IARC<sup>1</sup> en 2007). Cependant ils peuvent être utilisés dans le calcul des facteurs d'émissions (liste de 16 HAP<sup>2</sup> pris en compte par l'EPA<sup>3</sup> par exemple). La norme française X43-329 de mesure à l'émission n'en retient que 8<sup>2</sup> et le protocole d'Aarhus 4<sup>2</sup>, les composés pris en compte dans ces deux derniers textes sont considérés comme lourds, présents essentiellement sous forme particulaire. Les valeurs de facteurs d'émission présentées dans la littérature sont donc extrêmement variables en fonction du nombre de HAP retenus.

Les émissions des HAP sont formées lors d'une combustion incomplète. Les conditions de combustion, l'humidité de la biomasse, l'essence de bois, etc. jouent donc un rôle essentiel. Ces composés se forment plutôt dans la plage de température allant de 700 à 900°C et se décomposent au-delà.

<sup>1</sup> Centre International de Recherche sur le Cancer

<sup>2</sup> liste des 16 HAP, des 8 HAP et des 4 HAP : naphtalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, chrysène, pyrène, fluoranthène, benzo (a) anthracène, benzo (b) fluoranthène, benzo (k) fluoranthène, benzo (a) pyrène, dibenzo (a,h) anthracène, indeno (1,2,3-cd) pyrène, benzo (g,h,i) pérylène

<sup>3</sup> US Environmental Protection Agency

Lors d'un brûlage à l'air libre de biomasse (naturelle et adjuvantée hors créosote), les émissions de HAP semblent assez liées à la qualité de la combustion. Les facteurs d'émission les plus élevés sont obtenus lorsque les feux sont couvants et la combustion lente (par manque d'oxygène) tels que les brûlages de feuilles, les simulations de feux de forêts et les brûlages de résidus agricoles.

Lors des essais de brûlage de biomasses naturelles et adjuvantées hors bois créosotés menés dans le cadre de cette étude, la proportion de chaque composé présent est relativement constante d'un essai à l'autre (cf. annexe 2).

La combustion de pneumatiques, de câbles électriques ou de traverses à l'air libre est à l'origine d'importantes émissions de HAP. Dans les deux premiers cas (pneus et câbles), la matière carbonée présente dans les matériaux n'est pas totalement oxydée du fait d'un manque d'oxygène lié à la rapidité de la réaction de combustion. Dans le dernier cas (traverses), les HAP proviennent a priori essentiellement d'une volatilisation de la créosote contenue dans le bois lors de la montée en température de ce déchet.

Biomasse	15 HAP <sup>1</sup>	8 HAP	4 HAP	Sources
Bois humides (30%)	19031	1161	196	Bhargava et al. 2002, Lutes et al. 1996
Branches	39501	3480	1482	PE (présente étude)
Feuilles	114006	6312	1992	PE
Déchets verts	35780	4603	2165	Lutes et al. 1996
Forêts	104354	10508	1640	Collet 2004
Chaume de blé	198676	5835	1861	Dhammapala et al. 2007, Jenkins et al. 1996
Chaume d'orge	117306	7765	4074	Jenkins et al. 1996
Chaume de maïs	5724	1034	249	Jenkins et al. 1996
Coupes d'arbres fruitiers	16620	1526	442	PE, Jenkins et al. 1996, Keshtar et al. 2006
Ecobuage	-	3553	1159	Dhammapala et al. 2007

<sup>1</sup> : 16 HAP de la liste EPA - acénaphthylène

*Tableau 5 : facteurs d'émission de HAP lors du brûlage à l'air libre de différentes biomasses (en µg/kg sur brut)*

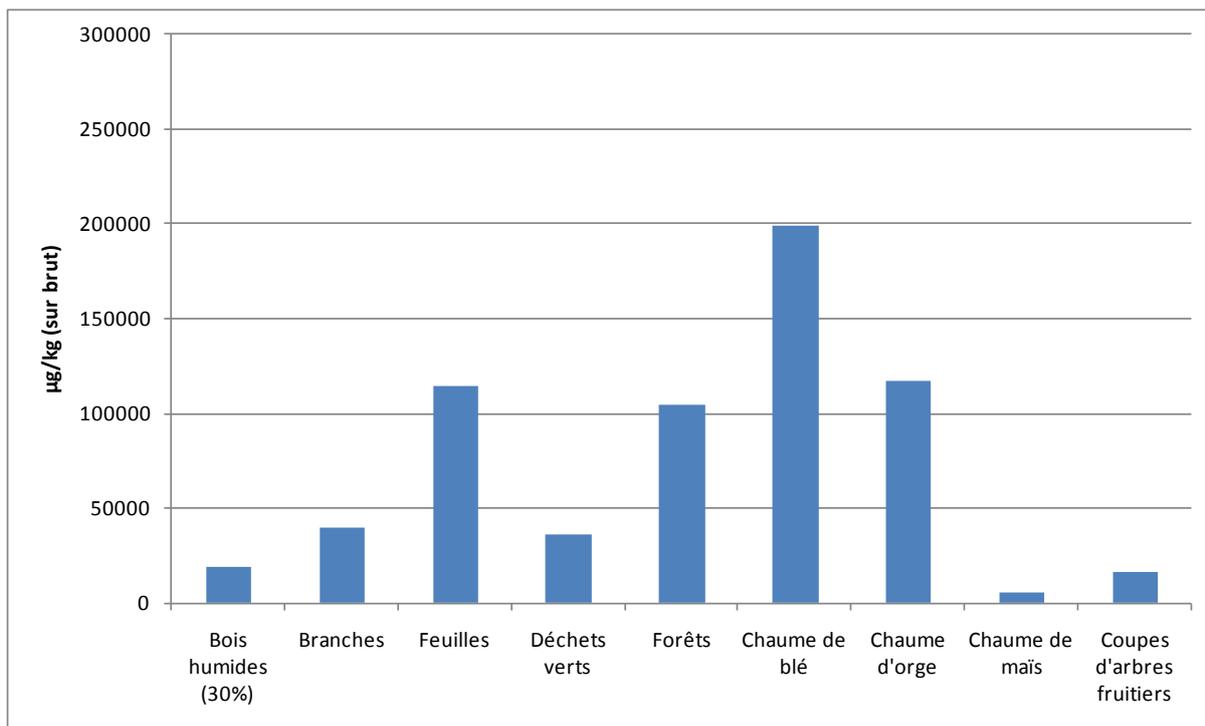


Figure 6 : émissions de HAP (15 éléments dosés) lors du brûlage à l'air libre de différentes biomasses

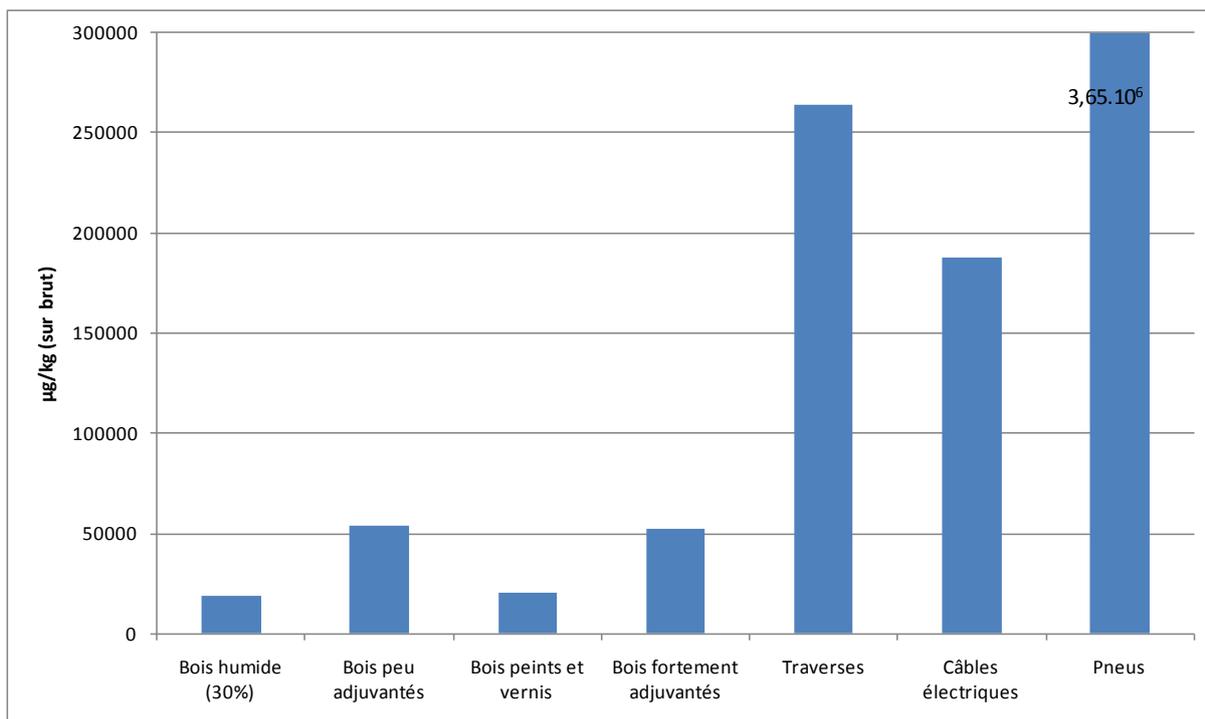


Figure 7 : émissions de HAP (15 éléments dosés) lors du brûlage à l'air libre de différents déchets

Les facteurs d'émission détaillés de HAP sont présentés en annexe 2.

#### 6.4.5 HCL

Biomasses et déchets brûlés	Facteur d'émission en mg/kg sur brut
Bois faiblement adjuvantés	32,0
Bois peints et vernis	31,3
Traverses	6,2
Branches	22,2
Feuilles	4,3
Forêt landaise	22 (19 à 25)
Forêt méditerranéenne	9,5 (6 à 13)

Tableau 6 : facteurs d'émission d'HCl lors du brûlage à l'air libre de divers déchets et biomasses

Les émissions d'acide chlorhydrique lors de la combustion à l'air libre de déchets (à base de bois) et de biomasses sont assez comparables. La teneur en chlore dans les matériaux testés lors de nos essais dépend davantage de la teneur en chlore du sol et de la capacité de la biomasse à l'extraire que des adjuvants utilisés, l'apport en chlore de ceux-ci étant a priori mineur. Peu de données sont présentées dans la littérature pour ce polluant.

#### 6.4.6 METAUX LOURDS

Les métaux sont présents essentiellement sur les particules fines en quantité extrêmement variable en fonction des teneurs en métaux présentes dans la biomasse brûlée. Or, celles-ci varient notablement en fonction de l'essence, de la disponibilité de ces éléments dans les sols et de la capacité de la biomasse à les extraire. Le zinc, le chrome, le cuivre et le manganèse sont souvent les éléments les plus répandus. Lors d'un brûlage de biomasse naturelle, les teneurs en métaux n'excèdent généralement pas quelques centaines de µg/kg pour chaque élément.

Les métaux lourds n'ont été recherchés que lors des essais de brûlage de bois de démolition où ces polluants étaient susceptibles d'être présents en grande quantité. En effet, ces déchets ont pu être peints, revêtus ou traités avec des produits contenant des métaux.

Les métaux majoritairement émis par le bois de démolition sont le plomb et le zinc. Ces résultats confirment ceux d'Uhde et al. 1996 qui avaient relevé la présence de ces métaux à des teneurs élevées (comprises entre quelques dizaines de mg/kg et quelques dizaines de g/kg) à la surface des pièces de bois utilisées dans le bâtiment. Les bois les plus anciens sont souvent fortement contaminés par ces métaux. Les oxydes de plomb et de zinc étaient, par le passé, d'importants pigments blancs. Ils ont été très largement utilisés.

La combustion de bois faiblement adjuvantés, triés visuellement, émet également ces éléments, toutefois en quantité moindre que les bois peints et vernis. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les anciennes peintures finissent par visuellement disparaître, le bois prenant un ton grisé similaire à celui du bois naturel vieilli en extérieur.

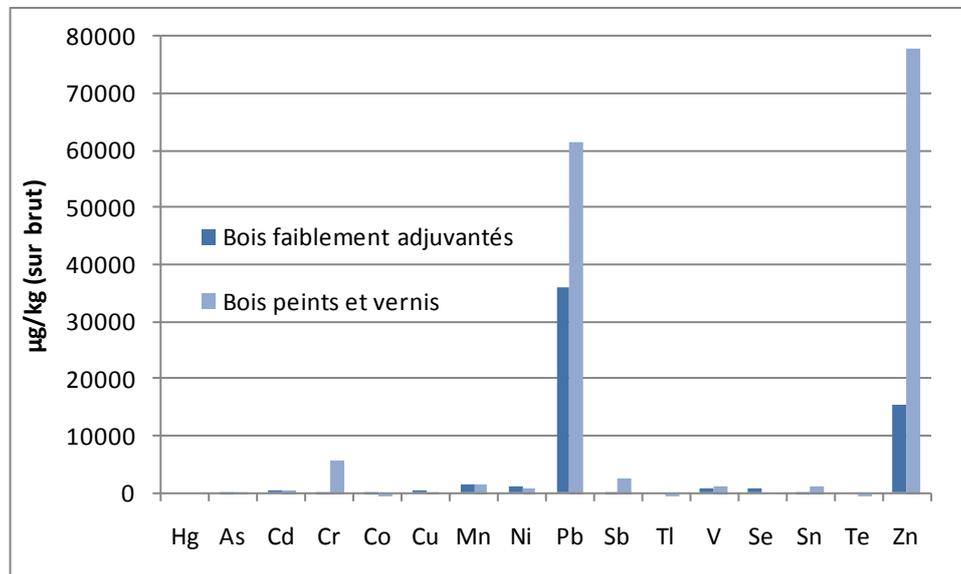


Figure 8 : émissions de métaux lors de la combustion à l'air libre de bois de démolition

#### 6.4.7 BTEX- ALDEHYDES

Agaki et al. 2010 et Andreae et al. 2001 ont compilé de nombreuses données relatives à ces polluants. Ces valeurs sont exprimées en termes de facteurs d'émission en g/kg sur sec. Le présent document reprend quelques données de la littérature exprimées en g/kg sur brut.

Le brûlage de pneus à l'air libre génère d'importantes émissions de benzène (2,2 g/ kg brûlé), toluène, xylènes et phénol. Le brûlage de bois de démolition n'est pas à l'origine de plus fortes émissions que lors du brûlage de biomasses naturelles.

Parmi les principaux composés organiques volatils émis lors d'un brûlage de biomasses naturelles, citons les benzène, toluène, formaldéhyde et acide acétique. Un tableau récapitulatif des facteurs d'émission de composés organiques volatils est proposé ci-dessous en fonction des différents types de biomasse brûlés.

Le brûlage à l'air libre de la biomasse semble être à l'origine d'émissions plus élevées de composés carbonyles, qui résultent, d'une décomposition thermique de la cellulose (Lemieux et al. 2004).

Composés	Pneus	Bois de démolition	Bois humides (30%)	Coupe d'arbres fruitiers	Déchets verts	Pâturage	Forêt	Chaume de blé	Chaume d'orge	Chaume de maïs
Références	Lemieux et al. 1993	PE	Jenkins et al. 1996	Jenkins et al. 1996	Lutes et al. 1996 Hays et al. 2002	Andreae et al. 2001 <sup>1</sup>	Andreae et al. 2001 <sup>1</sup>	Jenkins et al. 1996	Jenkins et al. 1996	Jenkins et al. 1996
Acétaldéhyde		195			522	275	264			
Acide acétique						-	2090			
Acroléine		235				44	132			
Benzaldéhyde	314	16	nd		30	16		33	33	24
Benzène	2181	190	320	23	265	127	270	135	138	32
Butadiène	235				102	39	33			
Ethylbenzène	378	< 35			24	7	26			
Formaldéhyde		132			453	193	1210			
Phénol	533		172	11	58	2		45		33
Styrène	653		204	9	51	13	72	85	604	15
Toluène	1368	207	254	15	150	72	220	48	76	42
Xylènes	929	< 48	56	3	71	25	110	24	17	

<sup>1</sup> : données sur brut estimé à partir d'une humidité de la biomasse de 45%

*Tableau 7 : facteurs d'émission de COV lors du brûlage à l'air libre de différentes biomasses et de déchets (en mg/kg sur brut)*



## **7. COMMENTAIRES**

- Cette étude permet de compléter la connaissance des émissions de polluants provenant des brûlages à l'air libre de biomasse et de déchets en proposant des facteurs d'émission de polluants pour les principaux brûlages à l'air libre répertoriés en France, sans prétendre être exhaustive. Elle permet de comparer les facteurs d'émission des différentes biomasses et déchets entre eux.
- Une recherche bibliographique a permis de recueillir les données de la littérature et de les comparer aux résultats obtenus dans le cadre de notre étude. La disponibilité de ces données dans la littérature varie en fonction des polluants et du type de biomasse ou déchets brûlés. Aucune donnée n'a, par exemple, été recensée pour le brûlage à l'air libre de déchets de bois de démolition. Parfois des données sont disponibles mais ne peuvent être converties dans l'unité souhaitée, faute d'informations suffisantes.
- Les résultats obtenus mettent en évidence le lien, parfois très fort, entre la qualité de la combustion (notamment l'apport suffisant en oxygène), l'humidité de la biomasse, la composition du matériau brûlé et les émissions de polluants. En effet :
- Un feu de feuilles ou d'herbes (feux couvant) émet davantage de polluants organiques et de particules qu'un feu de branches (feu vif),
- Une biomasse sèche émet moins de polluants que la même biomasse humide,
- Les déchets peuvent être à l'origine de bien plus fortes émissions que la biomasse naturelle. Par exemple, des émissions importantes de polluants sont mis en évidence lors du brûlage de :
  - traverses : émissions de HAP et COV,
  - bois de démolition : émissions de dioxines, furanes, PCB et métaux lourds,
  - câbles électriques : émissions de HAP, dioxines et furanes,
  - pneus : émissions de poussières, COV et HAP.
- En ce qui concerne les bois de démolitions, ces essais mettent en évidence qu'un tri visuel est suffisamment efficace pour minimiser les émissions de dioxines et furanes mais pas les émissions de métaux. Ils confirment que ces déchets nécessitent d'être éliminés dans une filière appropriée.
- Le brûlage à l'air libre de la biomasse est à l'origine d'émissions de particules, de HAP et de COV plus particulièrement lors de feux couvant mais est à l'origine de faibles émissions de dioxines et furanes quelle que soit la qualité de la combustion.

Ces brûlages influencent directement la qualité de l'air au moins au niveau local. Certains composés émis, présents sur des particules fines, peuvent se propager sur de longues distances et se déposer sur les sols, les plantes, etc. et contaminer la chaîne alimentaire. Les cendres de ces feux contiennent également des polluants qui peuvent polluer les sols et l'eau. Des efforts doivent donc être faits pour restreindre ces pratiques d'autant que des alternatives existent : collecte des déchets verts, compostage individuel, etc. et à condition que les particuliers soient suffisamment informés.

- Enfin, il convient de noter que certains résultats reposent sur un faible nombre de données tels que les feux de pneus ou de câbles électriques et mériteraient d'être complétés. D'autres sources n'ont quasiment pas encore à l'heure actuelle été quantifiées. Parmi ces sources, potentiellement importantes pour certains polluants, citons les incendies de véhicules ou de bâtiments qui devront faire l'objet d'études.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- Adam K., Emission de dibenzodioxines et dibenzofuranes lors de la combustion de câbles électriques, étude INERIS réalisée pour le compte du ministère chargé de l'environnement (1999)
- Alves C.A., Gonçalves C., Pio C.A., Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland, *Atmospheric Environment* 44 (2010), 3024-3033
- Andreae M.O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Chemical Cycle*, 15 No 4 (2001), 955-966
- Black R., Meyer C., Touati A., Gullett B.K. Fiedler H., Mueller J.F., Emission factors for PCDD/PCDF from forest and crop fires - Revision of category 6a of the UNEP Toolkit, *Dioxin 2010 San Antonio* September 12-17, 2010
- Bhargava A; Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M., Emission of polyaromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans from fires of wood chips, *Fire Safety Journal*, 37 (2002), 659-672
- Becker L., Matuschek G., Lenoir D., Kettrup A., Thermal degradation of wood treated with creosote, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 57 (2001), 15-36
- Bremmer, Troost, Kuipeo, Konig and Sein, Emission of dioxins in The Netherlands, rapport TNO/RIVM, February 1994
- Cheng M.T., Horng C.L., Su Y.R., Lin L.K., Lin Y.C., Chou C.C., Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung City, Taiwan, *Journal of Hazardous Materials* 165 (2009), 187-192
- Collet S., Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de forêt et de décharge, étude INERIS réalisée pour le compte de l'ADEME et du ministère chargé de l'environnement (2004) téléchargeable sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)
- Collet S., Fiani, E., PAH, PCB and PCDD/F emissions from simulated forest and landfill fires, *Organohalogen Compound* 69 (2007), 307-310
- Delmas R., Lacaux JP., Brocard D., Determination of biomass burning emission factors : methods and results, *Environmental Monitoring and Assessment* 38 (1995), 181-204
- Dhammapala R., Claiborn C., Corkill J., Gullett B., Particulate emissions from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning un eastern Washington and northern Idaho, *Atmospheric Environment* 40 (2006), 1007-1015
- Dhammapala R., Claiborn C., Jimenez J., Corkill J., Gullett B., Simpson C., Paulsen M., Emission factor of PAHs, methoxyphenols, levoglucosan, elemental carbon and organic carbon from simulated wheat and Kentucky bluegrass stubble burns, *Atmospheric Environment* 41 (2007), 2660-2669
- Estrellan C.R., Lino F., Toxic emissions from open burning, *Chemosphere* 80 (2010), 193-207
- Gullett B., Touati A.; Oudejans L., PCDD/F and aromatic emissions from simulated forest and grassland fires, *Atmospheric Environment* 42 (2008), 7997-8006

- Hays M.D., Geron C.D., Linna K.J. Smith N.D., Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels, *Environmental Science & Technology* 36 (2002), 2281-2295
- Hays M.D., Fine P.M., Geron C.D., Kleeman M.J., Gullett B.K., Open burning of agricultural biomass, *Physical and Chemical Atmospheric Environment* 39 (2005), 6747-6764
- Janhäll S. Andreae M.O. Pöschl U., Biomass burning aerosol emissions from vegetation fires: particle number and mass emission factors and size distributions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10 (2010) 1427-1439
- Jenkins B.M. et al. Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations, California Environmental Protection Agency April 1996
- Kannan G.K., Gupta M., Kapoor J.C., Estimation of gaseous products and particulate matter emission from garden biomass combustion in a simulation fire test chamber, *Atmospheric Environment* 39 (2005) 563-573
- Keshtkar H., Ashbaugh L.L., Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon particulate emission factors from agricultural burning, *Atmospheric Environment* 41 (2007) 2729-2739
- Lemieux P.M., Ryan J.V., Characterization of air pollutants emitted from a simulated scrap tire fire, *Air Waste Management Association Journal* 43 (1993) 1106-1115
- Lemieux P.M., Lutes C.C. Santoianni D.A. Emissions of organic air toxics from open burning : a comprehensive review, *Energy and Combustion Science* 30 (2004) 1-32
- Li X., Wang S., Duan L., Hao J., Li C., Chen Y., Yang L., Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in china, *Environmental Science & Technology* 41 (2007), 6052-6058
- Lutes C.C. Kariher P.H. Evaluation of emissions from the open burning of land-clearing debris, EPA-600/R-96-128 October 1996
- Pohlandt K., Bockelmann C. Marutzky R. Concentrations of pentachlorophenol and lindane in various assortments of wood, *Chemosphere* 31 (1995), 19, 4025-4031
- Meyer, C., T. Beer, and J. Mueller, Technical report No 1 Dioxin Emissions from Bushfires in Australia, 2004
- Meyer, C., Mueller, J.F., Symons, R.K., 2009.[http://www.cmar.csiro.au/e-print/open/2009/meyercp\\_a.pdf](http://www.cmar.csiro.au/e-print/open/2009/meyercp_a.pdf)
- Ortiz de Zarate I., Ezcurra A., Lacaux J.P., Van Dinh P., Emission factors estimates of cereal waste burning in Spain, *Atmospheric Environment* 34 (2000) 3183-3193
- Ryan J.V., Characterization Of Emissions from the simulated Open Burning Of scrap Tires, EPA-600/2-89-054, October 1989, Research Triangle Park
- Ryu S.Y., Kwon B.G., Kim Y.J., Kim H.H., Chun K.J., Characteristics of biomass burning aerosol and its impact on regional air quality in the summer of Gwangju, Korea, *Atmospheric Research* 84 (2007), 362-373

- Sahai S., Sharma C., Singh D.P., and al., A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in India, *Atmospheric Environment* 41 (2007) 9173-9186
- Schaaf M.D., Cereal-grain residue open-field burning emissions study, Air Sciences Inc., Final report July 2003
- Soares Neto T.G., Carvalho J.A., Veras C.A.G. et al., Biomass consumption and CO<sub>2</sub>, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire, *Atmospheric Environment* 43 (2009) 438-446
- Uhde E. Salthammer T. Marutzky R. Heavy metal content of wooden furniture coatings, *Toxicological and Environmental Chemistry* 53 (1996), 25-31
- Wasson S., Linak W., Gullett B. and al. Emissions of Chromium, Copper, Arsenic, and PCDDs/Fs from open burning of CCA-treated wood, *Environmental Science & Technology* 39 (2005), 8865-8876
- Wevers M., De Fre R., Desmedt M., Effect of backyard burning on dioxin deposition and air concentrations, *Chemosphere* 54 (2004), 1351-1356
- Wardoyo A., Biomass burning : particles emissions, characteristics, and airborne measurements PhD Queensland University of Technology, July 2007
- Zhang H., Ye X., Cheng T., Chen J., Yang X. Wang L., Zhang R., A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China : emission factors and emission inventory, *Atmospheric Environment* 42 (2008) 8432-8441



## 9. LISTE DES ANNEXES

Annexe	Désignation	Nombre de pages
1	Méthodes de mesurage	7
2	Résultats détaillés (HAP)	4



# **ANNEXE 1**

---

## **Méthodes de mesurage**



Paramètre	Principe	Référence normative
O <sub>2</sub>	Paramagnétisme	NF EN 14789
CO <sub>2</sub>	Infrarouge non dispersif	NF X 20-380 + X 43 300 -
CO	Infrarouge non dispersif	NF EN 15058
NO <sub>x</sub> (NO et NO <sub>2</sub> )	Chimiluminescence	NF EN 14792
COVT  COVNM	Méthode par ionisation de flamme	NF EN 12619 NF EN 13526 NF X 43-554
Poussières	Prélèvement isocinétique, piégeage sur filtre – méthode gravimétrique	NF X 44-052 NF EN 13284-1
Poussières fines	Prélèvement par impaction – méthode gravimétrique	NF EN ISO 23210
Métaux particuliers et gazeux	Prélèvement isocinétique et piégeage sur filtre et par barbotage dans une solution acide	NF EN 14385
Hg particulaire et gazeux	Prélèvement isocinétique et piégeage sur filtre et par barbotage dans une solution de K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> dans HNO <sub>3</sub>	NF EN 13211
HCl	Prélèvement isocinétique et piégeage par barbotage dans H <sub>2</sub> O	NF EN 1911
HAP	Prélèvement isocinétique et piégeage sur filtre et sur adsorbant solide	NF X 43-329
Dioxines / furanes	Prélèvement isocinétique et piégeage sur filtre et sur adsorbant solide	NF EN 1948
COV spécifiques	Piégeage sur charbon actif Piégeage sur autres supports spécifiques	NF EN 13649

## **Description des méthodes de mesurage en continu au moyen d'analyseurs automatiques**

### **Mesurages de O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>**

L'échantillon d'effluent gazeux est prélevé au moyen d'une pompe étanche fonctionnant à un débit de 60 l/min.

Les gaz sont filtrés à l'aide d'un filtre chauffé en céramique de marque M&C type PSP4000 puis la vapeur d'eau est condensée dans un système de refroidissement type EC de M&C afin d'abaisser le point de rosée des gaz humides jusqu'à 4°C et éviter ainsi la condensation dans la ligne de prélèvement et dans les analyseurs. Une partie du gaz (représentant environ 50% du débit total) passe dans la chaîne d'analyse.

Les concentrations en gaz sont donc exprimées sur gaz sec.

### **Mesurages de COVT/COVNM**

- Les mesurages en continu de COVT, CH<sub>4</sub>, COVNM (COV totaux, méthane, COV non méthaniques) sont effectués après prélèvement avec une sonde chauffée, filtration et transfert avec une ligne chauffée jusqu'à l'analyseur à ionisation de flamme.
- Pour déterminer la concentration en COVNM, l'analyseur doit être équipé d'un four d'oxydation sélective. L'analyseur mesure alors les COVT et le CH<sub>4</sub>, et la concentration en COVNM est déterminée par différence entre les concentrations de COVT et de CH<sub>4</sub>.
- Les mesurages sont donc effectués sur gaz humide.
- NOTE : les mesurages de COV totaux (COVT) sont effectués selon les normes NF EN 12619 et NF EN 13526. La méthodologie de détermination des COVNM est définie dans la norme française XP X 43-554, le mesurage des COVNM étant une spécificité de la réglementation française.

La gamme de mesurage des analyseurs utilisés, sont listées dans le tableau ci-après.

<b>Paramètres mesurés</b>	<b>Analyseurs et gammes de mesurage utilisés</b>
O <sub>2</sub>	Analyseur multigaz PG250 Références : M-CF-15212 / M-CF-15214 Gamme : 0-25% volume
CO	Analyseur multigaz PG250 Références : M-CF-15212 / M-CF-15214 Gamme : 0-25% volume
NO / NO <sub>x</sub>	Analyseur multigaz PG250 Références : M-CF-15212 / M-CF-15214 Gamme : 0-25% volume
CO <sub>2</sub>	Analyseur multigaz PG250 Référence : M-CF-15212 / M-CF-15214 Gamme : 0-20% volume
COVT/COVNM	Analyseur JUM Référence : M-CF-15212

### **Description des méthodes manuelles de mesurage**

- Les mesurages manuels de vitesse/débit, teneur en vapeur d'eau, poussières, SO<sub>2</sub>, HCl, métaux lourds, Hg, PCDD/PCDF et HAP sont réalisés par exploration de la section de mesurage en plusieurs points conformément aux exigences des normes.
- Lorsque plusieurs méthodes manuelles sont mises en œuvre simultanément (cas de SO<sub>2</sub>, HCl, métaux lourds, Hg et poussières) avec la même ligne principale pour le piégeage des fractions particulaires (poussières et métaux lourds particulaires) et plusieurs lignes secondaires pour le piégeage des fractions gazeuses (respectivement SO<sub>2</sub>, HCl et métaux lourds gazeux), les mesurages sont effectués conformément au guide d'application GA X 43-551 « Qualité de l'air - Émissions de sources fixes - Harmonisation des procédures normalisées en vue de leur mise en œuvre simultanée ».

### **Mesurage de la vitesse et du débit**

- Le mesurage du débit des gaz est réalisé au moyen d'un tube de Pitot associé à un capteur de pression, selon la méthode décrite dans la norme ISO 10780, en réalisant une cartographie des pressions dynamiques du gaz sur la section de mesurage et un mesurage de la pression statique sur chaque axe exploré.

### **Mesurage de température**

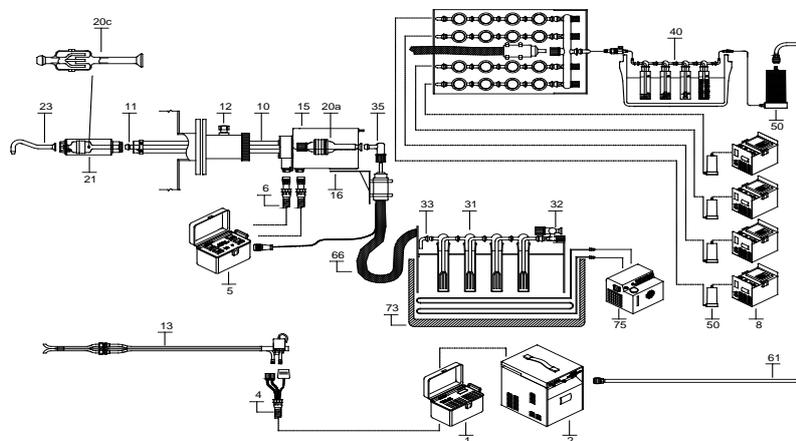
- La température des gaz dans le conduit est déterminée au moyen d'un thermocouple K.

## Mesurage de la teneur en vapeur d'eau

- La teneur en vapeur d'eau est mesurée selon la norme NF EN 14790.
- Le mesurage consiste à prélever un échantillon de gaz au moyen d'une sonde chauffée, à filtrer les gaz et à piéger la vapeur d'eau au moyen d'une unité de prélèvement comprenant un étage de condensation et un étage d'absorption.
- La teneur en vapeur d'eau est déterminée par gravimétrie, par pesée de l'unité de piégeage avant et après prélèvement.

## Mesurage simultané avec la même ligne principale et plusieurs lignes secondaires en parallèle des concentrations en poussières totales, en SO<sub>2</sub>, en HCl, en Hg, et en métaux lourds

- Les prélèvements de poussières, de SO<sub>2</sub>, de HCl, de Hg et de métaux sont effectués simultanément, conformément au guide d'application GA X 43-551, et aux normes NF X 44-052 pour les poussières, NF EN 14792 pour le SO<sub>2</sub>, NF EN 1911 pour HCl, NF EN 13211 pour Hg et NF EN 14385 pour les métaux lourds.
- Le dispositif de prélèvement est schématisé sur la figure ci-dessous. Une même ligne principale est utilisée pour l'ensemble des paramètres mesurés et permet le piégeage des poussières et de la fraction particulaire de Hg et des métaux lourds. 3 lignes secondaires permettent respectivement le piégeage du SO<sub>2</sub> et de la fraction gazeuse de Hg et des métaux lourds.



La méthodologie mise en œuvre est la suivante :

- Sur la ligne principale, l'échantillon de gaz est prélevé de manière isocinétique au moyen d'un ensemble de prélèvement en verre comprenant une sonde, un filtre-plan en fibres de quartz positionné hors du conduit, un compteur à gaz sec pour déterminer le volume de gaz échantillonné et une pompe dont le débit est régulé pour respecter l'isocinétisme.

Le filtre plan permet de piéger les poussières et la fraction particulaire de Hg et des métaux lourds.

La température de filtration doit être prise égale à la température de filtration la plus élevée parmi les températures de filtration exigées pour les différents composés mesurés avec le même dispositif de prélèvement. Dans le cas de la présente prestation, il s'agissait des métaux qui doivent être prélevés à une température de 20°C au-dessus de la température des gaz ou de la température de rosée selon la plus grande des deux.

- Le SO<sub>2</sub>, l'HCl et la fraction gazeuse de Hg et des métaux lourds sont piégés sur des lignes de prélèvement secondaires placées en aval du porte-filtre. Chaque ligne secondaire, en verre comprend un module d'absorbants avec fritté (2 absorbants pour le SO<sub>2</sub>, l'HCl et 3 absorbants pour les métaux lourds) remplis d'une solution d'absorption spécifique, suivi d'une cartouche d'agent desséchant, d'un compteur à gaz sec et d'une pompe dont le débit est fixé à 2 l/minute.
  - Pour le SO<sub>2</sub> : la solution d'absorption est de l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 3% ;
  - Pour HCl : la solution d'absorption est de l'eau déionisée ;
  - Pour Hg : la solution d'absorption est une solution K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4% dans HNO<sub>3</sub> 20% ;
  - Pour les métaux lourds : la solution d'absorption est une solution HNO<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O.

En fin de prélèvement, le filtre et les solutions d'absorption sont conditionnés respectivement dans une boîte de Pétri en verre et dans des flacons en polyéthylène.

La sonde de prélèvement est rincée à l'eau et à l'acétone (*si mesurage des poussières seules*), à l'eau, à l'acétone et à l'acide nitrique (*si mesurage des poussières, métaux et Hg*) afin de prendre en compte les poussières qui s'y déposent.

Les absorbants sont rincés avec la solution d'absorption pour le SO<sub>2</sub> et HCl, et avec une solution d'acide nitrique pour Hg et les métaux lourds.

- La quantité de poussières piégée sur les filtres est déterminée par pesée des filtres avant et après prélèvement, après étuvage (1h à 180°C avant prélèvement et 1h à 160°C après prélèvement) et passage au dessiccateur.
- Le produit de rinçage de la sonde de prélèvement est évaporé à sec dans un bêcher. L'extrait sec est déterminé par pesée après passage dans un dessiccateur. La masse ainsi obtenue est ajoutée à l'augmentation de masse du filtre afin de déterminer l'indice pondéral.
- Les écarts de masse des filtres témoins et des bêchers témoins (bêchers identiques à ceux utilisés pour déterminer les extraits secs issus des rinçages de sonde), sont déduits des masses de poussières collectées.
- Les métaux lourds particuliers piégés sur le filtre sont analysés par ICP/MS après minéralisation des filtres. L'extrait sec issu du rinçage de la sonde est repris pour être minéralisé et est analysé ainsi que les solutions d'absorption.

- Pour le Hg, l'analyse est réalisée par spectrométrie d'absorption atomique en vapeur froide après réduction du mercure par du chlorure d'étain. Le filtre est au préalable minéralisé et l'extrait sec issu du rinçage de la sonde est repris pour être minéralisé.
- Les solutions de piégeage du SO<sub>2</sub> et de HCl sont analysées par chromatographie d'échanges d'ions.

### **Mesurage des HAP et des PCDD/DF**

Les HAP sont prélevés selon le mode opératoire décrit dans la norme NF X 43-329. Les 8 composés listés dans la norme sont ceux réputés représenter la famille des HAP au plan de la cancérogénèse. Aux cours de la présente étude, 17 composés ont été mesurés selon cette méthodologie.

Les PCDD/DF sont prélevés selon le mode opératoire décrit dans la norme NF EN 1948-1.

La méthodologie mise en œuvre est la suivante :

- L'échantillon est prélevé de manière isocinétique sans dérivation, grâce à un ensemble complet de prélèvement en verre. Le dispositif de prélèvement comprend une sonde et un filtre plan en fibres de quartz, hors du conduit, maintenus à une température la plus basse possible mais supérieure au point de rosée des gaz afin d'éviter toute condensation, une cartouche remplie de résine XAD-2 préalablement conditionnée, précédée d'un condenseur pour abaisser la température en entrée de la résine en-dessous de 20°C et un pot à condensats. Les gaz sont prélevés au moyen d'une pompe dont le débit est réglable, et le volume prélevé est mesuré avec un compteur à gaz sec.

La température de filtration a été maintenue à 120-125°C.

- Les différents supports de piégeage : filtre, condensats, résine XAD-2 et solvants de rinçage de la sonde, du porte-filtre, du réfrigérant et du pot à condensats sont collectés et traités en laboratoire.

En ce qui concerne les HAP, les échantillons solides (filtre, résine) sont extraits au Soxhlet au DCM ; les échantillons aqueux sont traités par extraction liquide-liquide avec du DCM. L'analyse quantitative est effectuée au moyen d'un chromatographe en phase liquide haute performance (HPLC) équipé d'un détecteur fluorescent.

En ce qui concerne les PCDD/DF, les échantillons sont confiés au laboratoire CARSO pour analyse selon la norme NF EN 1948.

## Limites de quantification analytiques

Les limites de quantification analytiques (LQ) sont les suivantes :

Composé	HCl	SO <sub>2</sub>	HAP
LQ	0,05 mg/l de solution d'absorption	0,01 mg/l de solution d'absorption	10 µg/l de solution d'extraction

Métaux lourds/Hg	LQ µg/l	LQ µg/filtre
As	0,5	0,1
Cd	0,25	0,05
Co	0,25	0,05
Cr	0,25	0,05
Cu	0,54	0,11
Mn	0,25	0,05
Ni	0,5	0,1
Pb	0,5	0,1
Sb	0,25	0,05
Tl	0,5	0,1
V	0,54	0,11
Sn	0,5	0,1
Zn	0,5	0,1
Hg	0,5	0,03

## Poussières

On distingue principalement les PM<sub>10</sub>, les PM<sub>2.5</sub>, les PM<sub>1</sub>, particules ayant respectivement un diamètre inférieur à 10 µm, 2.5 µm, et 1 µm. Les TSP (Total Suspended Particules) représentent l'ensemble des particules, sans distinction de taille. Ce sont les particules de faibles diamètres (< 2.5µm) qui par leurs facilités à pénétrer dans le système respiratoire sont considérés comme les plus toxiques.



## **ANNEXE 2**

---

### **Résultats détaillées (HAP)**



Composés	Proportion moyenne (%)	Minimum (%)	Maximum (%)
2 Méthyl naphtalène	12.7	8.2	17.3
2 Méthyl fluoranthène	0.03	0.02	0.05
Naphtalène	61.5	56.9	64.5
Acénaphtylène	1.1	0.5	1.6
Acénaphène	3.9	2.5	4.5
Fluorène	9.8	7.3	13.7
Phénanthrène	2.2	1.8	2.8
Anthracène	0.8	0.7	0.9
Chrysène	2.5	1.7	3.3
Pyrène	3.1	2.0	3.9
Fluoranthène	0.55	0.1	0.9
D(a,h)A	0.03	0.02	0.05
B(g,h,i)P	0.7	0.4	1.1
B(b)F	0.6	0.6	0.8
B(k)F	0.24	0.24	0.31
B(a)P	0.8	0.8	1.2
In(1,2,3,c,d)P	0.7	0.7	1.0

Répartition des HAP dosés (biomasse naturelle et adjuvantée hors bois créosotés)  
déterminée lors de nos essais

Facteurs d'émission en µg/kg (sur brut)	Bois <sup>(1)</sup> humide (30%)	Bois peu adjuvantés	Bois peints et vernis	Bois fortement adjuvantés	Traverses	Câbles électriques	Pneus
2 Méthyl naphthalène	1756	5591	1795	6809	119372	nd	nd
2 Méthyl fluoranthène	nd	< 15	< 11	25	12	800	nd
Naphtalène	13552	33681	13617	33813	117530	140800	650950
Acénaphtylène	1131	nd	nd	nd	nd	nd	711550
Acénaphène	1074	949	335	25	69244	20	1368000
Fluorène	470	2684	991	25	43618	6300	223650
Phénanthrène	1697	8130	2309	5439	22830	20500	245000
Anthracène	309	1628	493	1250	1850	5800	52950
Chrysène	87	530	155	25	800	20	81200
Pyrène	676	1501	631	1721	1151	2700	92750
Fluoranthène	850	2269	682	2027	2864	6700	398350
B(a)A	114	533	169	75	680	2100	92300
D(a,h)A	< 8	< 15	< 11	25	17	20	550
B(g,h,i)P	< 8	278	128	222	436	20	112700
B(b)F	131	393	136	234	959	1300	78900
B(k)F	52	140	50	143	327	200	86850
B(a)P	19	464	154	370	716	100	99350
In(1,2,3,c,d)P	< 8	455	214	231	398	50	68550
Somme 15 HAP	19027	53635	20066	52334	263421	187430	3652050
Somme 8 HAP	1161	4533	1533	3301	6397	10490	937550
Somme 4 HAP	196	1453	554	978	2400	1650	333650

(1) : données de la littérature : Bhargava et al. 2002, Jenkins et al. 1996

### Emissions de HAP lors du brûlage à l'air libre de différents déchets

Facteurs d'émission en µg/ kg (sur brut)	Bois (Pin)	Bois (Ponderosa)	Bois (Douglas)	Branches	Feuilles	Déchets verts	Déchets verts	Patûrage herbes sèches	Chaume de blé	Chaume de blé
Humidité	34,4	24,5	30	62	45,6	-	-	9	8,9	7,3
Publication	Bhargava et al.	Jenkins et al.	Jenkins et al.	PE	PE	Lutes et al.	Lutes et al.	Dhammapala et al.	Dhammapala et al.	Dennis et al.
2 Méthyl naphthalène		1710	1803	8288	20761	6250	8030			996
2 Méthyl fluoranthène				< 8,9	20					
Naphtalène	18360	12805	9497	28951	85529	14060	24595			181870
Acénaphthylène	636	1065	1693			5375	9035	6279	3164	1394
Acénaphthène	50	1410	1763	241	1110			546	199	155
Fluorène	297	513	600	1207	5200	2245	445	1456	750	289
Phénanthrène	379	1958	2757	3466	9828	3755	8005	3640	3706	3725
Anthracène	98	324	506	843	2794	1980	1685	1092	1266	976
Chrysène	35	76	152	391	894	665	600	500,5	271	1246
Pyrène	197	805	1028	922	2338	1910	2410	1001	1175	2249
Fluoranthène	296	1020	1236	1203	2736	90	2645	1092	1266	3575
B(a)A	82	86	175	254	529	500	470	1001	786	1185
D(a,h)A	nd	< 7	< 7	10	39			127	108	< 9
B(g,h,i)P	nd	< 7	< 7	530	1015	575	595	173	75	952
B(b)F	326	28	39	376	621	665	760	282	425	1033
B(k)F	32	29	95	150	224	665	860	400	461	438
B(a)P	nd	14	25	559	729	240	510	428	353	371
In(1,2,3,c,d)P	nd	< 7	< 7	397	418	175	455	49	29	612
Somme 15 HAP	20152	19069	17872	39501	114006	27525	44035			198676
Somme 8 HAP	736	1178	1570	3480	6312	2910	6295	3553	3503	8166
Somme 4 HAP	358	72	159	1482	1992	1745	2585	1159	1267	2454

Emissions de HAP lors du brûlage à l'air libre de diverses biomasses

Facteurs d'émission en µg/ kg (sur brut	Chaume d'orge	Chaume de maïs	Coupe fruitiers	Coupe fruitiers	Coupe fruitiers	Coupe fruitiers	Feux de forêt	Feux de forêt	Feux de forêt	Feux de forêt
Humidité	6,9	8,6	20	18,3	33,1	-	-	-	-	-
Publication	Dennis et al.	Dennis et al.	PE	Jenkins et al.	Jenkins et al.	Keshtkar et al	Collet et al.	Collet et al.	Collet et al.	Collet et al.
2 Méthyl naphthalène	2511	806	5059	118	1325		9699	22115	18581	19479
2 Méthyl fluoranthène			17	0	0					
Naphtalène	74757	1908	20125	5970	9743		23667	82008	76442	74740
Acénaphthylène	10936	321		2179	710					
Acénaphthène	8670	391	17	145	1151		2556	4785	3703	2940
Fluorène	2516	67	17	38	622		6	4	4	3
Phénanthrène	16149	1302	3040	1666	1333	1538	8228	19448	13448	11707
Anthracène	2793	220	529	261	250		1856	4666	3111	2410
Chrysène	1327	186	17	168	52	345	4937	12543	3687	3084
Pyrène	3330	617	663	365	651	1080	2831	5294	4018	3261
Fluoranthène	2143	655	798	428	866	968	5473	8690	5898	4953
B(a)A	1052	130	135	175	40	278	1452	4092	2416	1748
D(a,h)A	9	< 9	17	< 7	< 7	135	37	35	35	3
B(g,h,i)P	486	< 9	81	2	3	413	37	35	35	278
B(b)F	2238	60	125	35	< 7	255	432	1015	743	549
B(k)F	558	166	46	41	4	368	838	82	90	73
B(a)P	727	22	129	23	12	323	428	1040	695	574
In(1,2,3,c,d)P	551	< 9	77	< 7	< 7	330	6	4	4	242
Somme 15 HAP	117306	5724	25814	9317	14728		52783	143742	114329	106564
Somme 8 HAP	7765	1034	1407	704	926	3068	8702	14994	9917	8419
Somme 4 HAP	4074	249	377	99	16	1275	1698	2137	1529	1196

Emissions de HAP lors du brûlage à l'air libre de diverses biomasses