



Caractéristiques des particules issues du chauffage domestique au bois

Alexandre Balestrucci, Benoît Brandelet

► To cite this version:

Alexandre Balestrucci, Benoît Brandelet. Caractéristiques des particules issues du chauffage domestique au bois. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. hal-01867139

HAL Id: hal-01867139

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01867139>

Submitted on 4 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Rapport du Projet de Fin
d'Etude
- Promo 2013 -**

**Caractéristiques des particules issues du
chauffage domestique au bois**

LERMAB, ENSTIB, Université de Lorraine

**BALESTRUCCI Alexandre
BRANDELET Benoît
2012 / 2013**

**Tuteur : Mr Yann Rogaume
Co-tuteur: Mme Caroline Rogaume**

SOMMAIRE

- PARTIE 1 - CONTEXTE.....	4
- PARTIE 2 - CHAUFFAGE DOMESTIQUE BOIS.....	6
1. Les différents types de poêles.....	6
1.1. Les Poêles.....	6
1.2. Les foyers fermés	7
2. Les émissions types	8
2.1. Dans le cas d'une combustion parfaite.....	8
2.2. En réalité :	8
- PARTIE 3 - DONNEES GENERALES SUR LES PARTICULES	9
1. Les différents types	9
2. Composition chimique	12
3. Impact sur la santé	14
- PARTIE 4 - METHODES DE MESURES	15
1. Méthodes de prélèvement de la fraction solide des particules :	16
1.1. Méthode gravimétrique manuelle de la NF EN 13284-1	16
1.2. Méthode allemande/autrichienne DIN+ :	19
1.3. L'Impacteur Electrique Basse Pression (ELPI).....	20
1.4. Impacteur Manuel.....	22
1.5. Tunnel à dilution (NS 3058-2).....	23
2. Méthode de mesure de la fraction condensable des particules :.....	26
2.1. Méthode EN TS 15439 : 2006.....	26
2.2. . Méthode américaine US EPA5H.....	27
- PARTIE 5 - IMPACT DE LA METHODE DE MESURE	28
- PARTIE 6 - LE CHAUFFAGE AU BOIS ET LES PARTICULES.....	32
1. Bilan des études.....	32
2. Carbone élémentaire et carbone organique	33
3. Evolution du chauffage bois	33
3.1. Les solutions de mesure.....	33
3.2. Les solutions sur le terrain.....	34
- PARTIE 7 - CONCLUSION BIBLIOGRAPHIE	36
- PARTIE 8 - PARTIE EXPERIMENTALE.....	37
1. Introduction	37
2. Protocole.....	37
3. Analyse des résultats	41
3.1. TESTO.....	41
3.2. Impacteur manuel	44
3.3. ELPI	46

SOMMAIRE

- PARTIE 9 - CONCLUSION EXPERIENCE	49
- PARTIE 10 - RESUME / SUMMARY	50
- PARTIE 11 - BIBLIOGRAPHIE	51
- PARTIE 12 - ANNEXES	52
1. Schéma de Christian Gaegauf	52
2. signification des abréviations du schéma de Gaegauf	53

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Les normes de qualité de l'air	4
Figure 2 : Schéma de principe d'un poêle à haut rendement	7
Figure 3 : Schéma de principe d'un foyer fermé (marque Supra).....	7
Figure 4 : Répartition par secteurs des émissions de TSP en France	10
Figure 5 : Répartition par secteurs des émissions de PM10 en France	10
Figure 6 : Répartition par secteurs des émissions de PM2,5 en France	11
Figure 7 : Répartition par secteurs des émissions de PM1 en France	11
Figure 8 : Cycles des aérosols et sources (source : Thèse Christine PIOT).....	12
Figure 9 : Pourcentage massique des composants des PM1 selon la source	13
Figure 10 : Schéma de Christian Gaegauf.....	15
Figure 11 : Schéma de principe avec filtre dans le conduit.....	16
Figure 12 : Schéma de principe avec filtre hors du conduit.....	17
Figure 13 : Photographie de l'ELPI	20
Figure 14 : Impacteur et son principe de collecte des particules.....	21
Figure 15 : Composition d'un étage de l'impacteur	21
Figure 16 : Impacteur manuel DEKATI.....	22
Figure 17 : Schéma de principe du dispositif de prélèvement sur filtres	23
Figure 18 : Schéma de principe du tube à dilution.....	24
Figure 19 : Schéma de principe du dispositif de mesure de la norme EN TS 15439 :2006.....	26
Figure 20 : Facteurs d'émission du bois selon les pays	28
Figure 21 : Différentes sources d'impacts sur les résultats	29
Figure 22 : L'influence du débit.....	30
Figure 23 : L'influence due à la sonde.....	31
Figure 24 : Bilan des études	32
Figure 25 : Les principales méthodes de diminution d'émissions, avantages/inconvénients	35
Figure 26 : Schéma des expériences	38
Figure 27 : Foyer fermé de mesure	39
Figure 28: Foyer fermé avec l'indicateur de masse à gauche	39
Figure 29 : Testo, déshumidificateur et pompe de l'impacteur manuel	39
Figure 30 : Installation de l'ELPI	40
Figure 31 : Dispositif de mesure	40
Figure 32 : Courbe du CO en fonction du temps	41
Figure 33 : Courbe de l'O2et de la température des fumées en fonction du temps	42
Figure 34 : Courbe du rendement en fonction du temps	42
Figure 35 : Courbe de la masse de bois en fonction du temps	43
Figure 36 : Particules recueillies sur le plateau de collection PM2,5.....	44
Figure 37 : Tableau des pesées des filtres de l'impacteur manuel	45
Figure 38 : Tableau des masses relatives à chaque classe de particules	45
Figure 39 : Répartition de la masse selon la taille des particules.....	46
Figure 40 : Détermination des facteurs d'émission selon les classes de particules.....	46
Figure 41 : Présence des particules selon la taille.....	47
Figure 42 : Répartition en nombre des particules.....	47
Figure 43 : Evolution de la concentration en PM 2.5 en fonction du temps	48
Figure 44 : Evolution du débit en nombre en fonction du temps	48

- PARTIE 1 - CONTEXTE

A l'heure où la conscience écologique et le développement durable deviennent normés et donc obligatoires, la société crée des débats pour avancer. Au cœur de ces débats, on trouve de nombreux éléments dont entre autres, la qualité de l'air. Par l'expression « qualité de l'air », on considère l'étude de tous les polluants (dioxyde de carbone, méthane, particules...) présents dans l'air.

Aujourd'hui, on retrouve dans les normes différentes valeurs, limites ou cibles :

- **Objectif de qualité** : C'est le but annuel correspondant à une qualité de l'air jugée acceptable. Il s'agit d'une réglementation française. Il n'y a aucune pénalité si l'objectif n'est pas obtenu.
- **Valeur limite** : C'est le but annuel représentant la valeur à laquelle on réduirait les effets sur la santé et l'environnement. Celle-ci est une réglementation européenne qui a été reprise dans la réglementation française. Des procédures pénales contre des pays de l'Union Européenne peuvent être engagées si jamais ces pays dépassent cette valeur limite.
- **Valeur cible** : C'est un but à long terme publié par l'Union Européenne fonctionnant sur le même principe que l'objectif de qualité.

On retrouve ces différentes valeurs dans les normes françaises et européennes de qualité de l'air (figure 1, source : normes françaises et européennes de qualité de l'air 2011)

Particules PM10				
X		Objectif de qualité	Niveau annuel	30 µg/m ³
X	X	Valeurs limites	Niveau annuel	40 µg/m ³
X	X		Niveau journalier, à ne pas dépasser plus de 35 fois sur l'année	50 µg/m ³
X		Seuil de recommandation et d'information	Niveau journalier	50 µg/m ³
X		Seuil d'alerte	Niveau journalier	80 µg/m ³
Particules PM2,5				
X		Objectif de qualité	Niveau annuel	10 µg/m ³
X		Valeur cible	Niveau annuel	20 µg/m ³
	X	Valeur cible	Niveau annuel	25 µg/m ³
				2008 : 30 µg/m ³
				2009 : 29 µg/m ³
				2010 : 29 µg/m ³
				2011 : 28 µg/m ³
				2012 : 27 µg/m ³
				2013 : 26 µg/m ³
				2014 : 26 µg/m ³
				2015 : 25 µg/m ³
				2020 : 20 µg/m ³
X	X	Valeur limite	Niveau annuel	
X	X	Obligation en matière de concentration relative à l'exposition	Niveau sur 3 ans à l'échelle nationale, sites de fond dans les agglomérations	2013-2014-2015 : 20 µg/m ³
X	X	Objectif national de réduction de l'exposition	Diminution de 15 ou 20 % ⁽¹⁾ entre 2011 et 2020 du niveau national de fond dans les agglomérations	(1) selon le niveau de 2011

Figure 1 : Les normes de qualité de l'air

L'étude des particules présentes dans l'air et la diminution de ses teneurs est pour la France un enjeu majeur. En effet, la France est actuellement mise en demeure par l'Union Européenne à ce sujet à cause d'un non respect de la valeur limite (évoquée précédemment). Il lui faut donc impérativement diminuer ces quantités de particules. Il existe plusieurs leviers opérationnels pour la France afin de diminuer ces chiffres. Il lui faut agir sur les différentes sources de cette pollution atmosphérique. On retrouve dans ces acteurs le transport, l'industrie, le chauffage domestique, ... Quelques études scientifiques (AirParif Bilan 2011, CITEPA) dénoncent le chauffage domestique comme une source très importante d'émission de particules. Le chauffage au bois serait d'après ces mêmes études prédominant au niveau de l'émission des particules fines (en deçà de dix micromètres).

Là où le cercle sans fin se crée est au niveau du grenelle de l'environnement. En effet il réclame une baisse des particules dans l'air ambiant de 30% en parallèle d'une part de 20 à 25% d'énergies renouvelables dans l'offre d'énergie française, comme nous le rappelle le rapport Particulair. La part du bois énergie dans les énergies renouvelables françaises croît et continuera de croître dans les prochaines années. Il faudra donc parvenir à mesurer l'émission de ce secteur et connaître sa véritable influence tout en utilisant des méthodes de mesure reproductibles et comparables à d'autres secteurs. Il s'agit là d'un grand défi.

Le but de cette étude bibliographique n'est donc pas de défendre un résultat plus qu'un autre, mais bel et bien de faire un point sur les influences du chauffage bois domestique. Pour se faire, nous nous devons donc en premier temps de rappeler les différents systèmes de chauffage domestique au bois qui existent ainsi que leurs émissions types. Il nous faudra ensuite donner quelques généralités sur les particules microscopiques (PM), que ce soit les différents types, leur composition chimique ou leurs effets sur la santé. Avant d'analyser un quelconque résultat, nous ferons un point sur les méthodes de mesures à travers des fiches techniques contenant les caractéristiques des principales méthodes utilisées. Nous pourrons alors analyser l'influence de l'appareillage et de la méthode sur les résultats obtenus. Ces différents points nous emmèneront finalement à faire le point sur le chauffage au bois et les particules afin de comprendre les mesures et identifier les questions toujours irrésolues.

Afin de mettre en pratique la théorie acquise et de se rendre compte des difficultés, nous effectuerons ensuite des essais normalisés. Nous pourrons donc présenter les protocoles suivis pour enfin analyser les résultats, et surtout en discuter.

- PARTIE 2 - CHAUFFAGE DOMESTIQUE BOIS

Le chauffage au bois est en France la première énergie renouvelable. On peut considérer le bois comme renouvelable car la forêt française croît plus que ce qu'on consomme. Il faut aussi savoir que 85% du bois énergie est utilisé dans des appareils indépendants. Ils sont donc plus que représentatifs.

1. Les différents types de poêles

Il existe de nombreux types de chauffage domestique. Nous n'effectuerons ici qu'une introduction/présentation de deux types de chauffage uniquement :

- Poêles à bois
- Foyers fermés

Ces deux appareils font partie de ce que l'on appelle des appareils divisés. C'est-à-dire des appareils de chauffage indépendants.

Nous pouvons nous concentrer sur ces deux éléments uniquement pour être représentatif puisqu'à eux deux, ils représentent environ 75% des ventes actuelles nous indique les techniques de l'ingénieur *Production de chaleur à partir du bois* - Combustible et appareillage Référence BE8747 | Date de publication : 10 avr. 2005 | Yann ROGAUME . Les schémas/images, principes de cette partie seront basés sur cette même documentation des techniques de l'ingénieur.

1.1. Les Poêles

Les poêles (de masse ou classiques) sont assez en vogue ces temps-ci. Ils sont le plus souvent utilisés en appoint et on les trouvera souvent dans le salon. Cela est dû à son design qui leur permet de vraiment faire partie du mobilier des français.

Performance :

Au niveau de leur performance, elle peut être très variable selon le type d'appareil et sa gamme. Leur rendement peut aller de 30% à 80% sur PCI environ. Leur puissance varie elle aussi de 5 à plus de 15KW.

Les différentes technologies :

Ils peuvent chauffer une pièce par simple convection naturelle, ou par distribution d'air chaud. La technologie poêle de masse utilise surtout le rayonnement de roche captant la chaleur de l'appareil. Ces pierres par rayonnement chauffent les murs de la pièce.

Il existe aussi des poêles muni d'un système automatique à granulés. Cela permet un chauffage permanent au bois.

Principe :

La majorité du temps, les poêles ont un fonctionnement des plus simples. Le bois sera disposé sur des grilles par lesquelles arrivera de l'air primaire. Dans ce type de poêle, l'encrassement de la vitre est important et le rendement est assez faible puisqu'il n'y a qu'une chambre de combustion.

Dans le poêle haut de gamme, le fonctionnement commence à être plus compliqué. On retrouve le schéma de principe sur la figure 2. L'air primaire arrive sous des grilles où le bois est placé. Se déroule alors la combustion primaire. De l'air injecté au niveau de la vitre

permet d'éviter un encrassement de celle-ci. Les fumées se dirigent via un obstacle dans la chambre de combustion secondaire avec une arrivée d'air secondaire. L'évacuation des fumées se fait ensuite classiquement.

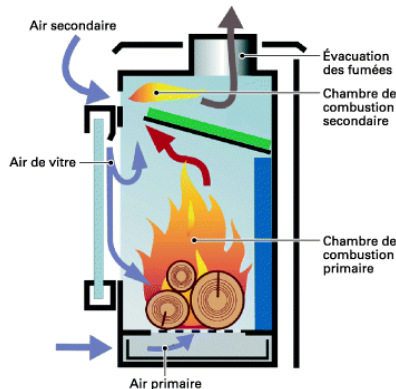


Figure 2 : Schéma de principe d'un poêle à haut rendement

1.2. Les foyers fermés

Ils se rapprochent beaucoup des inserts. Leur unique différence est qu'un insert peut s'installer dans une cheminée déjà existante alors que le foyer fermé s'installe seul. Les dimensions des deux appareils sont aussi un peu différentes.

Performance :

Ces appareils ont pour la plupart un rendement compris entre 40% et 80% sur PCI. Ils peuvent être très efficaces s'ils sont bien entretenus et bien utilisés. En cas de mauvaise utilisation, ils auront tendance à surchauffer la pièce où ils ont été aménagés et très peu le reste de la maison.

Les différentes technologies :

Les foyers fermés et inserts possèdent un échangeur thermique permettant de capter la chaleur pour la redistribuer. L'échangeur peut avoir comme fluide caloporteur de l'air, qui sera directement soufflé dans les pièces, ou alors de l'eau qui partira vers un chauffage central.

Principe :

Le principe de combustion de ces appareils est similaire à celui des poêles. La différence est sur la présence de l'échangeur thermique, comme nous le montre la figure 3.

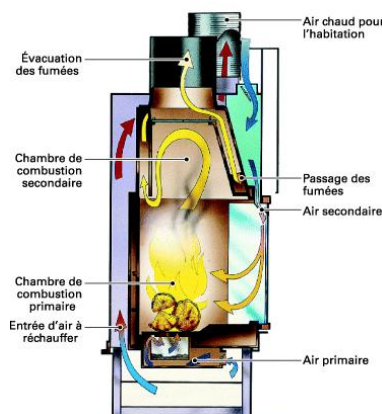


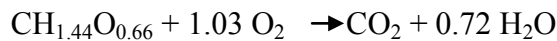
Figure 3 : Schéma de principe d'un foyer fermé (marque Supra)

Ces technologies de combustion en plusieurs étapes permettent de réduire considérablement le taux d'imbrûlés dans les fumées. Ce qui, dans notre étude, est un point important.

2. Les émissions types

2.1. Dans le cas d'une combustion parfaite

L'équation de combustion du bois simplifiée sans excès d'air est celle-ci :



Les émissions dans ce cas irréaliste et idéal de bois sec avec comme seuls composants le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, seraient véritablement aisées à déterminer. On ne trouverait en sortie que du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Il s'agit finalement ici d'un idéal vers lequel on tend à s'approcher le plus possible.

Ce modèle considère une combustion irréalisable dans le cas du bois, réputé pour son hétérogénéité. La maîtrise de la combustion joue donc un rôle important à ce stade car c'est celle-ci qui conditionne ce que va émettre notre combustion.

2.2. En réalité :

Nous retrouvons dans les techniques de l'ingénieur (*Production de chaleur à partir de bois - Émissions atmosphériques. Notions de base Référence BE8750 | Date de publication : 10 avr. 2011 | Erwan AUTRET, Yann ROGAUME*) les quatre principaux polluants émis lors de la combustion du bois qui sont :

- Le monoxyde de carbone (CO) qui est dû à une sous-oxydation du carbone
- Les Composés Organiques Volatiles (méthane, formaldéhyde, ...) qui sont dus à une sous-oxydation d'une chaîne carbonée
- Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques qui sont dus à une sous-oxydation d'hydrocarbures aromatiques
- Les particules fines, le cœur de ce projet

Le bois ne contenant pas de soufre ni de chlore et peu d'azote, les émissions en sulfure d'oxygène (SO₂), en hydro chlorure (HCl), en dioxines-furannes, en oxyde d'azote (NO_x) sont très faibles.

Les trois premiers types de polluants viennent tous d'une sous-oxydation. Ceux-ci peuvent donc être évités (pas pour la totalité bien entendu) par un flux d'air secondaire efficace.

S'ajoute à tout cela dans les fumées une grande partie d'azote et de dioxygène, puisque la combustion se déroule sous excès d'air.

- PARTIE 3 - DONNEES GENERALES SUR LES PARTICULES

1. Les différents types

Différents polluants sont issus de la combustion bois. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories à savoir les gaz et les espèces se répartissant entre une phase gazeuse et une phase particulaire.

Concernant les gaz, un premier ensemble de produits a pour origine la combustion incomplète de la biomasse utilisée. Par exemple, le monoxyde de carbone (CO), dont la formation s'effectue lors de l'oxydation du carbone du combustible, est l'espèce la plus présente dans sa catégorie. Nous trouvons également les COV, issus de la même source que le CO, dont le méthane (CH₄) fait partie malgré sa particularité de ne pas réagir dans la troposphère sous l'action du rayonnement solaire pour former des polluants photochimiques. D'ailleurs cette absence de contribution à l'effet photochimique des COV conduit souvent à distinguer le CH₄ du reste des COV dits non méthaniques. Un deuxième ensemble de produits en très faibles quantités faisant partie des gaz est constitué des oxydes d'azote et de soufre (NO_x et SO_x), consistant en l'oxydation de l'azote et du soufre du combustible, et de l'acide chlorhydrique HCl.

Pour ce qui est des espèces se répartissant entre phases gazeuse et particulaire, nous avons d'abord les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ce sont des hydrocarbures lourds qui apparaissent notamment durant l'étape de pyrolyse du bois. Mais nous avons également les particules en suspension dans l'air, intérêt principal de ce projet de fin d'étude. Aussi appelées aérosols, elles désignent l'ensemble comprenant les particules et la phase gazeuse environnante.

Les aérosols atmosphériques, par définition, sont une suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides présentant une vitesse de chute négligeable. L'ensemble des particules atmosphériques est généralement appelé PM soit Particulate Matter, désignation américaine signifiant « matière particulaire ». Les PM varient en taille, en forme et en composition chimique. Environ cinq catégories relatives à leur taille, habituellement comprise entre quelques nanomètres et plusieurs dizaines de micromètres de diamètre, ont été retenues afin d'étudier les PM.

Une première catégorie regroupant toutes les tailles confondues est celle des TSP, soit le total des particules en suspension. D'après le rapport du CITEPA/Format SECTEN de 2011, une réduction des émissions des TSP de 23% s'est opérée entre 1990 et 2009. Les 1086 kilotonnes émises en 2009 sont en grande partie dues à l'agriculture et à l'industrie manufacturière (figure 4, source : CITEPA/Format SECTEN-Avril 2011) :

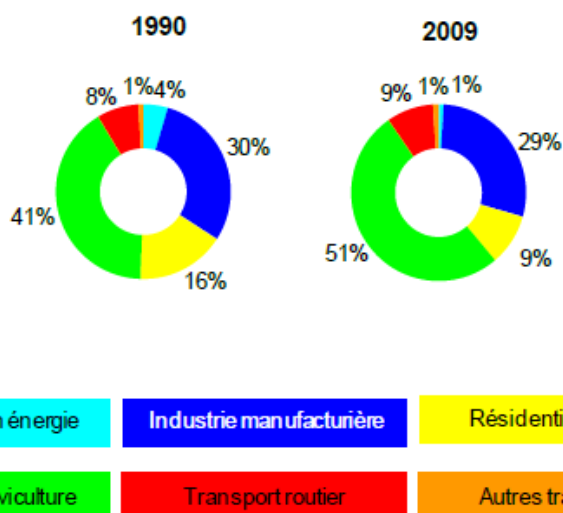


Figure 4 : Répartition par secteurs des émissions de TSP en France

Ensuite, ce sont les PM₁₀ qui sont considérées, soit toutes les particules ayant un diamètre inférieur ou égal à 10 μm . D'après le rapport du CITEPA/Format SECTEN de 2011, 36% de réduction d'émissions ont été opérées entre 1990 et 2009, les 435 kilotonnes émises en 2009 étant majoritairement dues à l'agriculture, l'industrie manufacturière et le secteur résidentiel/tertiaire avec notamment la combustion bois (Figure 5, source : CITEPA/Format SECTEN-Avril 2011) :

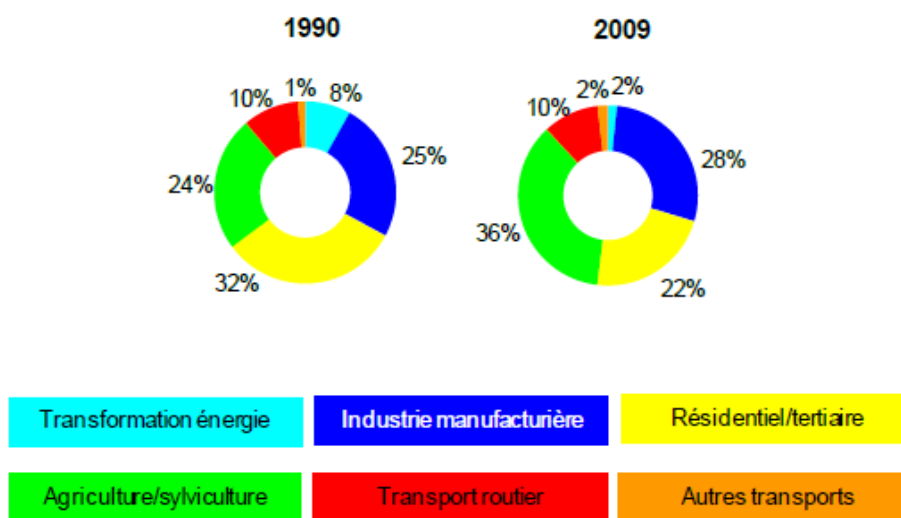


Figure 5 : Répartition par secteurs des émissions de PM₁₀ en France

La troisième catégorie d'aérosols utilisée pour les études est celle des PM_{2.5}, soit toutes les particules ayant un diamètre inférieur ou égal à 2,5 μm . D'après le rapport du CITEPA/Format SECTEN de 2011, 44% de réduction d'émissions ont été opérées entre 1990 et 2009, les 270 kilotonnes émises en 2009 étant majoritairement dues au secteur résidentiel/tertiaire avec la combustion bois en tête (Figure 6, source : CITEPA/Format SECTEN-Avril 2011) :

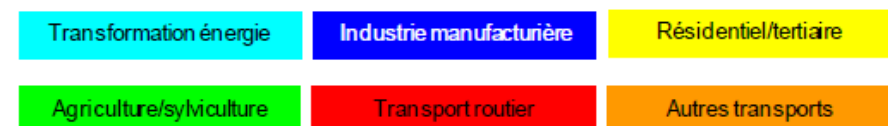
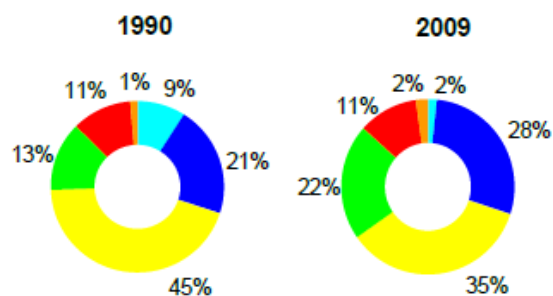


Figure 6 : Répartition par secteurs des émissions de $PM_{2.5}$ en France

L'avant dernière catégorie de particules regroupe celles ayant un diamètre inférieur ou égal à $1\ \mu m$, soit les PM_{10} . Nous avons réduit de 56% les émissions entre 1990 et 2009. Les 149 kilotonnes émises sont dues à la combustion de bois dans le résidentiel/tertiaire en grande majorité (Figure 7, source : CITEPA/Format SECTEN-Avril 2011) :

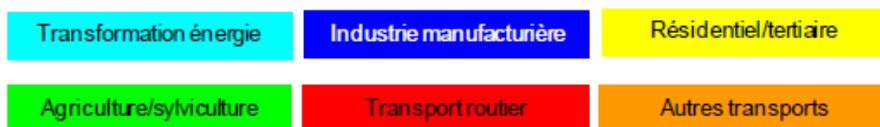
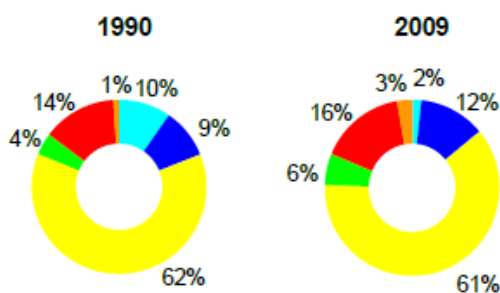


Figure 7 : Répartition par secteurs des émissions de PM_{10} en France

Une dernière catégorie, qui nous intéressera moins, correspond aux nanoparticules dont le diamètre est inférieur ou égal à $0,1\ \mu m$.

Selon leur manière de se former, les aérosols seront dits primaires ou secondaires. Les primaires sont directement émis sous forme solide et proviennent dans 90% des cas d'une source naturelle. Tandis que les secondaires sont issus de phénomènes physico-chimiques se déroulant dans l'atmosphère, conséquences de facteurs humains (industries, transport, ...) ou naturels (végétaux notamment). (Figure 8, source : Thèse Christine Piot p 16)

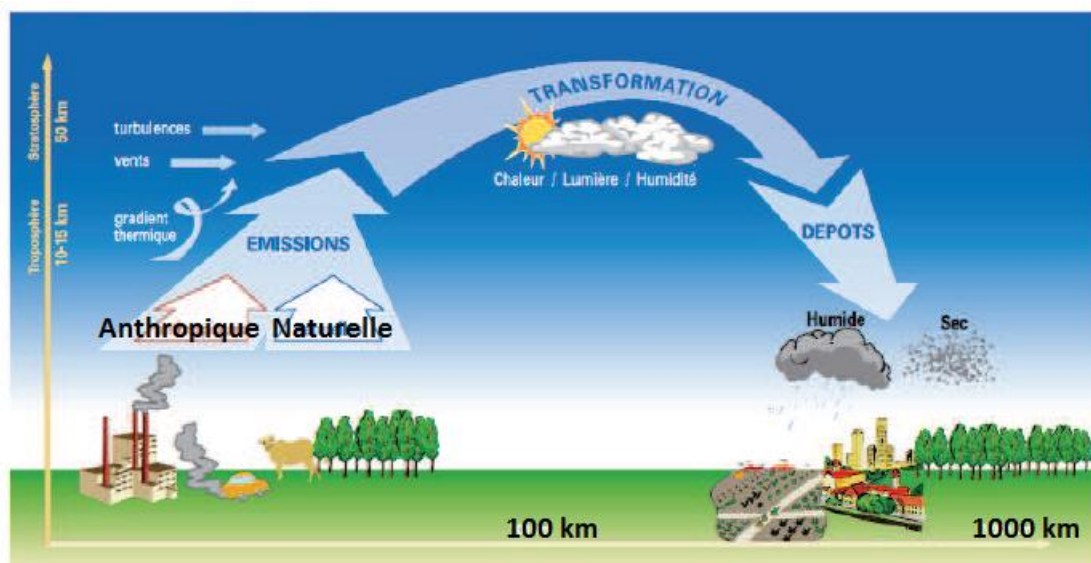


Figure 8 : Cycles des aérosols et sources (source : Thèse Christine PIOT)

Selon l'intensité du phénomène faisant office de source d'émission des aérosols et selon leur taille, ces derniers seront émis à des hauteurs différentes et donc transportés plus ou moins loin. Globalement, ce sont les divers phénomènes liés aux masses d'air qui régissent le mouvement des aérosols durant leur transport.

La manière de se déposer des PM peut être soit sèche soit humide. Les PM sèches se déposent par diffusion ou par sédimentation, selon qu'elles soient respectivement de petites tailles (diamètre < 10 nm) ou de plus grande taille (diamètre > 1 µm). Parallèlement, les dépôts humides correspondent aux aérosols présents dans l'atmosphère et donc dans les précipitations au sein des nuages, les évolutions de compositions chimiques subies les rendant hydrophiles.

2. Composition chimique

De manière générale, la composition chimique des aérosols est assez complexe, car composée à la fois d'éléments organiques, inorganiques et minéraux. Elle dépend à la fois de la source d'émission, et du vieillissement de l'aérosol, soit l'évolution physico-chimique subie lors du transport au sein de l'atmosphère ou des nuages. Nous pouvons également ajouter à cela les variations de la répartition des composés entre les phases gazeuse et particulaire des aérosols durant le trajet de l'émission au site récepteur. En effet, certains composés gazeux vont pénétrer à l'intérieur des particules (absorption) tandis que d'autres vont se fixer à leur surface (adsorption) ou se dissoudre dans leur phase aqueuse, ne laissant alors pas la phase particulaire exempte de gaz en son sein. A l'inverse, des phénomènes de désorption ou de volatilisation pourront conduire à des transferts de la phase particulaire à gazeuse.

Cependant, il nous est possible de définir une composition chimique globale des particules atmosphériques. Celle-ci comprend des espèces carbonées où l'on trouve la matière organique (OM) et le carbone élémentaire (EC), des espèces ioniques, des métaux, des éléments traces et de l'eau. Selon l'origine des aérosols, chacun de ces éléments sont en plus ou moins grande quantité. Ainsi, comme le montre la figure 9 (Source : Thèse de Christine Piot, figure 7 p 19), après une étude sur 19 sites urbains, 14 sites continentaux non urbains et

11 sites urbains, il s'avère que les pourcentages massiques d'espèces présentes dans les particules ne sont pas les mêmes selon la source.

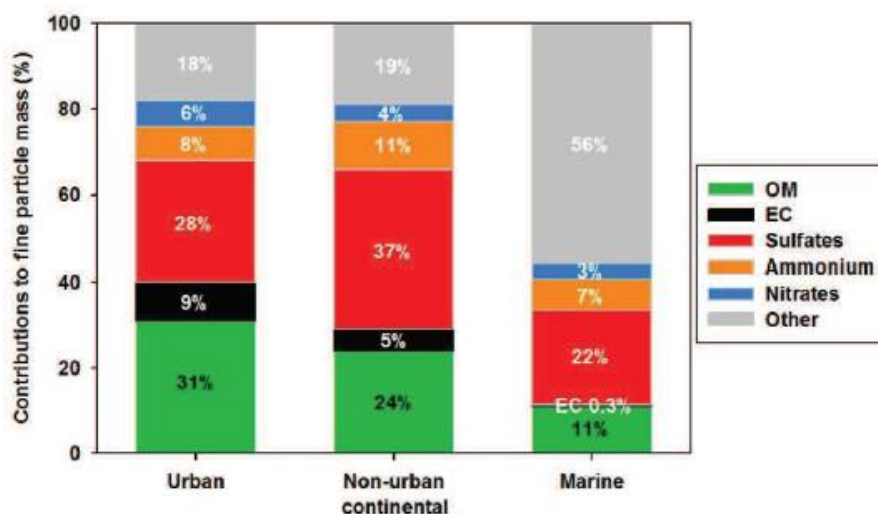


Figure 9 : Pourcentage massique des composants des PM_{10} selon la source

Concernant la matière organique, elle représente une fraction importante pouvant aller de 10 à 70% de la masse des particules, voire à 90% dans les forêts tropicales. Elle est composée notamment de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote. En effet, nous allons retrouver dans cette fraction organique des familles chimiques particulièrement émises lors de la combustion de biomasse, à commencer par les hydrocarbures. Ces derniers regroupent les alcanes, les hopanes mais surtout les HAP, espèces reconnues pour leur toxicité. La fraction organique comprend aussi des acides carboxyliques, des méthoxyphénols, des phtalates et des monosaccharides anhydres. Cette dernière famille citée nous intéresse particulièrement car détentrice du lévoglucosan et de ses deux isomères, le mannosan et le galactosan, issus de la dégradation de la cellulose. Ils sont émis en grande quantité lors de la combustion de biomasse, et surtout de bois.

Le carbone élémentaire, aussi appelé carbone suie, a la particularité d'avoir les propriétés d'un corps noir soit d'absorber la lumière. Il est donc aussi appelé Black Carbon (BC). Une distinction entre BC et EC est néanmoins couramment faite, à savoir la méthode d'analyse utilisée. L'EC va en effet être analysé par une méthode thermo-optique utilisant les propriétés thermiques du carbone suie, alors que le BC va être analysé par méthode optique utilisant ses propriétés optiques. Dans certains cas, il n'est pas exclu de voir le carbone élémentaire occuper 40% de la masse de la particule.

La fraction généralement majoritaire des aérosols est non carbonée. Elle se compose d'anions tels que les sulfates, les chlorures et les nitrates, et de cations tels que l'ammonium, le sodium, le magnésium, le calcium et le potassium. Nous pouvons également trouver des métaux tels que du fer, du cuivre ou du zinc en infime quantité, et des éléments traces tels que le strontium, le thallium ou le baryum. Cependant la présence de ces traces peut être révélatrice d'un certain type d'aérosol et n'est donc pas à négliger.

3. Impact sur la santé

L'importance de la granulométrie et de la taille des aérosols réside dans le fait qu'elle est directement liée à l'impact sur la santé humaine. En effet, une plus ou moins grande taille de particules sera synonyme d'une forte ou faible pénétration dans les trois régions anatomiques du système respiratoire.

La région extra thoracique, constituée par le nez et la bouche, accueille facilement les particules ayant un diamètre de plus de 10 micromètres. Ces dernières ne vont généralement guère plus loin. Elles sont évacuées par des processus mécaniques simples et quotidiens tels que se moucher, s'essuyer, éternuer ou avaler, ceci pouvant prendre un à plusieurs jours. La deuxième région concernée, à savoir la trachéo-bronchique, comprend la trachée et les bronches. Cette zone peut être sujette à l'inhalation de particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres. Leur évacuation se fait en 24 heures via leur transport jusqu'au système digestif. Mais le dépôt dans la troisième région qu'est la région pulmonaire reste, pour les humains, le plus impactant sur leur santé car les poumons apparaissent comme étant le tissu cible. Les particules arrivant à se frayer un chemin jusqu'à cette zone respiratoire sont celles affichant un diamètre inférieur à 2,5 micromètres. Généralement, elles sont rapidement éliminées par les macrophages alvéolaires, phagocytes des poumons, qui, suite à la phagocytose (destruction des corps étrangers), vont migrer vers le système digestif. Certains macrophages contenant des particules restent une centaine de jours à séjourner dans le corps humain avant de disparaître.

De nombreuses études épidémiologiques ont été réalisées dans le monde entier afin de voir l'influence des concentrations ambiantes de PM₁₀ sur la fréquence des pathologies respiratoires et cardiovasculaires. Pour des concentrations de particules variant de 10 à 174 $\mu\text{m}/\text{m}^3$, les observations ayant été faites sont une faible diminution réversible de la fonction pulmonaire chez des enfants et adultes normaux asymptomatiques ou souffrant déjà de certains troubles respiratoires tels que l'asthme. Plus les concentrations augmentent, plus la diminution moyenne du débit expiratoire augmente également, ceci étant souvent accompagné chez l'adulte de bronchites ou de toux. Les particules fines et ultrafines, type de particules le plus émis par la combustion de bois et de biomasse, sont plus inquiétantes dans la mesure où elles semblent être davantage responsables d'effets retardés sur la mortalité, notamment en matière de maladies cardiovasculaires. Les effets nocifs sont aigus et ont une importance toxicologique significative au vu de la présence en grand nombre de ces particules et du fait qu'elles ne soient pas forcément faciles à évacuer pour le corps humain. A très fortes concentrations, des essais sur des animaux ont donné lieu à leurs morts au bout de trente minutes.

- PARTIE 4 - METHODES DE MESURES

Dans cette partie, nous allons nous atteler à faire un état des lieux des quelques méthodes de mesure d'émissions des particules connues et utilisées à ce jour. L'inspiration ainsi que le contenu de ce qui suit proviennent en grande partie du rapport PEREN²BOIS, étude réalisée pour le compte de l'ADEME, et des normes mentionnées dans ce dernier. Le PEREN²BOIS traite de l'évaluation technico-économique des performances énergétiques et environnementales des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussières fines et de composés organiques pour les appareils de combustion domestiques utilisant la biomasse. Une partie de cette étude est consacrée à la mesure des émissions de particules. Certains systèmes ne peuvent mesurer que la fraction solide des aérosols tandis que d'autres servent à déterminer la fraction condensable voire même les deux simultanément. Nous distinguerons donc ces trois types de mesure. C'est sous forme de fiche technique que nous allons essayer de traiter cette partie dans un souci de clarté et de concision.

Le schéma de Gaegauf (figure 10, présente en annexe 1 en taille plus importante avec en annexe 2 la signification des abréviations) nous montre tous les stades de l'émission lors d'une combustion. Cette figure résume beaucoup de choses et permet de mieux comprendre ce que chacune des méthodes dont nous parlerons mesurent. Elle va même jusqu'à orienter ce qu'il faut mesurer. En effet, elle permet de voir rapidement les différences entre chaque stade (stade conduit ou stade atmosphère par exemple) et ainsi apporte un élément critique pour l'analyse des résultats. On peut ainsi dire grâce à elle que si l'on mesure dans l'atmosphère, on ne suivra pas uniquement le chauffage mais aussi les incendies et feux de forêts par exemple. Il s'agit donc ici d'un résumé schématique d'un cycle d'émission et donc une excellente base pour appréhender les complexités du monde de la mesure.

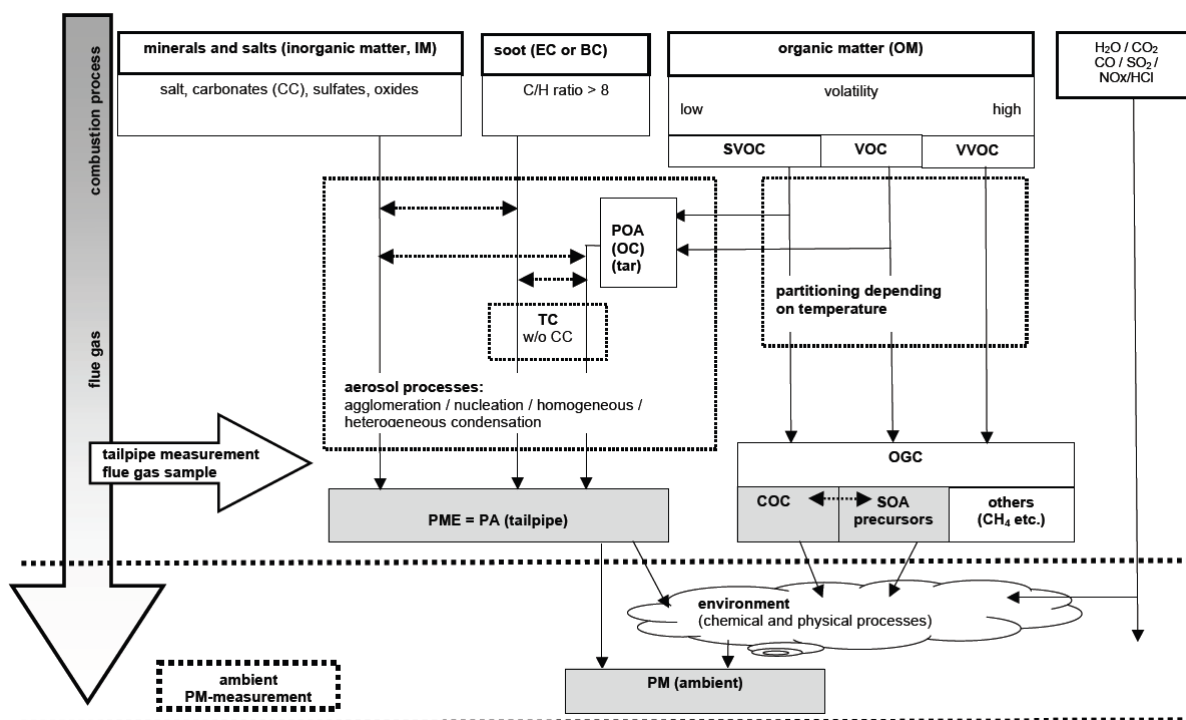


Figure 10 : Schéma de Christian Gaegauf

1. Méthodes de prélèvement de la fraction solide des particules :

1.1. Méthode gravimétrique manuelle de la NF EN 13284-1

- **Principe :**

Cette méthode de mesure consiste à prélever un échantillon de gaz, dont le volume est connu car mesuré au préalable, en différents points représentatifs d'un flux gazeux pendant une certaine durée avec un débit contrôlé et constant ou isocinétique. Les poussières, constituant la fraction solide des particules contenues dans l'échantillon de gaz prélevé, sont stoppées et collectées sur un filtre plan pré-pesé. Ce dernier va alors être séché puis soumis à une nouvelle pesée. En plus de ce qui a été recueilli sur le filtre, viennent s'ajouter les dépôts présents sur l'équipement de prélèvement situé en amont. La somme de l'augmentation de la masse du filtre et de la masse des dépôts en amont du filtre correspond aux poussières du gaz prélevées, ceci permettant alors le calcul de la concentration en particules solides.

- **Conditions de mesures :**

Nous allons tout d'abord passer en revue les différents composants de l'équipement de prélèvement. De manière générale, les matériaux utilisés doivent être résistants à la corrosion et à la chaleur tout en étant facilement nettoyables.

- Le dispositif de filtration : Le dispositif de mesure existe en deux versions différant par la position du système de filtration des particules. Ce dernier peut se trouver dans le conduit (Figure 11, source : figure 3 p 12 NF EN 13284-1), en étroite liaison avec la buse de prélèvement située en entrée, ou hors du conduit (Figure 12, source : figure 4 p 12 NF EN 13284-1) avec un tube d'aspiration le séparant de la buse. La courte liaison entre la buse et le filtre pour le premier des deux dispositifs cités sert simplement à réduire les dépôts de poussières en amont du filtre. Il faudra alors un tube de support (légende Figure 11 : 8) rigide, étanche et suffisamment long pour assurer le support mécanique de la buse et du logement du filtre, ainsi que pour atteindre tous les points de prélèvements nécessaires aux mesures. Cette dernière recommandation s'applique également au tube d'aspiration (légende Figure 12 : 8) du deuxième système avec le filtre hors du conduit. Par ailleurs une régulation de la température de ce tube et du logement du filtre est requise pour évaporer d'éventuelles gouttelettes d'eau pouvant colmater le filtre.

Légende

- 1 Buse d'entrée
- 2 Logement du filtre
- 3 Tube de Pilot
- 4 Capteur de température
- 5 Indicateur de température
- 6 Mesure de pression statique
- 7 Mesure de pression dynamique
- 8 Tube de support (dans le conduit)
- 9 Système de refroidissement et séchage
- 10 Unité d'aspiration et système de comptage
- 11 Manomètre

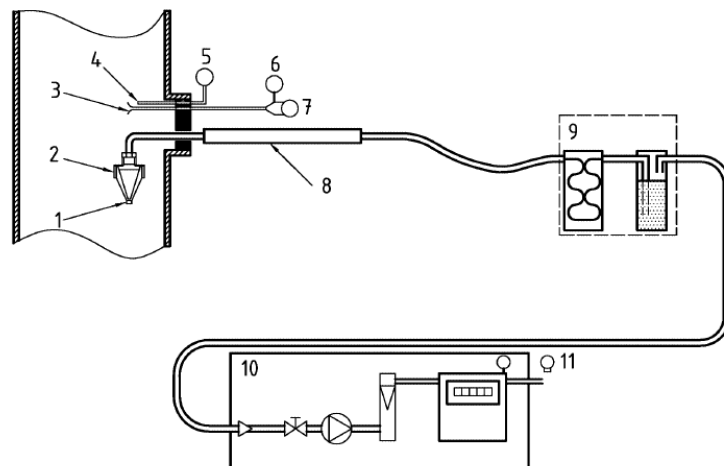


Figure 11 : Schéma de principe avec filtre dans le conduit

Légende

- 1 Buse d'entrée
- 2 Logement du filtre
- 3 Tube de Pilot
- 4 Capteur de température
- 5 Indicateur de température
- 6 Mesure de pression statique
- 7 Mesure de pression dynamique
- 8 Tube de d'aspiration (hors du conduit)
- 9 Système de refroidissement et séchage
- 10 Unité d'aspiration et système de comptage
- 11 Manomètre

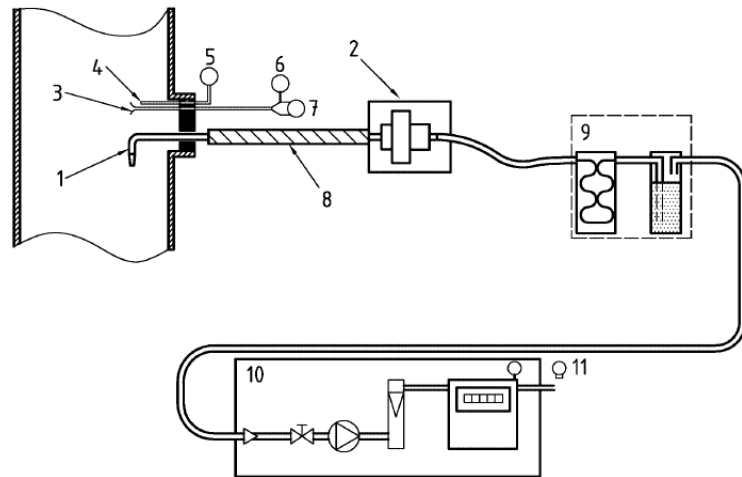


Figure 12 : Schéma de principe avec filtre hors du conduit

- La buse d'entrée : elle permet la pénétration du gaz à analyser dans l'équipement de prélèvement et est raccordée au tube d'aspiration ou au logement du filtre selon le dispositif. La buse doit particulièrement être effilée pour ne pas perturber le flux de gaz dès son entrée dans le système. Concernant le diamètre intérieur, une valeur supérieure à 8 mm sera souhaitée pour des raisons mécaniques, tandis que toute variation devra être conique et progressive.

- Le tube d'aspiration : sa présence n'est requise que pour un filtre placé en dehors du conduit. Les principales exigences vis-à-vis de cet élément concernent le lissage de sa surface interne et son polissage, dans le but de faciliter son examen et son nettoyage. La température du tube doit être régulée pour maintenir les conditions prévues pour la filtration du gaz.

- Le logement du filtre : il est comparable à un boîtier dans lequel sont montés le porte filtre et le filtre. Lorsqu'il est placé hors du conduit, sa température doit aussi être régulée pour éviter toute condensation et maintenir les conditions de filtration.

- Le filtre : un certain nombre d'exigences sont requises étant donné sa fonction primordiale pour notre mesure. Le fabricant doit certifier que l'efficacité du filtre s'élève à 99,9% pour un aérosol de diamètre moyen égal à 0,6 μm . De plus, le matériau filtrant doit bien évidemment ne pas réagir et ne pas absorber le gaz analysé, tout en étant thermiquement stable. Les matériaux préconisés sont notamment le quartz ou les fibres en polytétrafluoroéthylène (PTFE), la température du gaz passant à travers le filtre ne devant pas dépasser 230°C pour ces dernières. Les filtres en fibres de verres sont à proscrire au vu de leur réactivité face à certains composés acides.

- Système d'aspiration et de comptage des gaz : l'étanchéité aux gaz ainsi que la résistance à la corrosion sont de rigueur pour cette unité. La mesure du débit peut se faire sur gaz sec ou sur gaz humide.

Echantillonnage :

Outre toutes ces exigences concernant les éléments du dispositif de mesure, le conditionnement de la mesure passe également par un plan d'échantillonnage et un nombre de points de prélèvements bien choisis. Globalement l'échantillonnage est possible sous réserve qu'un emplacement approprié soit disponible avec une vitesse de gaz élevée et uniforme.

Le plan d'échantillonnage doit donc être accessible avant tout. Il devra se trouver dans une section de conduit droit vertical de forme et d'aire de section constantes, et relativement éloigné de tout élément pouvant perturber l'écoulement, comme un coude ou un ventilateur.

Le choix du nombre de points de prélèvement se fait en fonction des dimensions du plan d'échantillonnage. Il y aura d'autant plus de points que le plan sera grand. La norme EN 13284-1 a établi ce nombre de point en fonction des dimensions et du type de section des conduits.

Température :

Une autre condition de mesure non négligeable est la température à laquelle va s'opérer la mesure. La générale stabilité thermique des particules peut parfois être entravée par la présence de composés instables ou semi-volatils (forme particulaire à basse température, forme gazeuse à haute température). Les écarts de mesure des concentrations en poussières peuvent être conséquents. L'idéal serait de déterminer une température conventionnelle la plus élevée et supportée par les particules prélevées avant pesée, chose délicate au vu du grand nombre de situations différentes pouvant être rencontrées. Le but étant de piéger le moins possible ces composés instables ou d'assurer leur évaporation lors du séchage, des conditions de température ont été établies pour tous les éléments de l'équipement de prélèvement vu précédemment, destinés à être pesés :

- une température de 180°C sera requise avant le prélèvement
- une température de 160°C ou moins pendant le prélèvement
- une température de 160°C après le prélèvement.

Durée d'échantillonnage :

La durée totale d'échantillonnage doit être de minimum 30 minutes, sachant qu'une éventuelle augmentation jusqu'à 60-90 minutes pourrait améliorer la reproductibilité des mesurages.

• **Domaine d'application de la méthode/granulométrie :**

Cette méthode est une référence pour la mesure de faibles concentrations de poussières inférieures à 50 mg/m³ dans les conditions normales de température et de pression. C'est sur des concentrations avoisinant les 5 mg/m³ qu'elle a été validée en particulier. Elle a été principalement développée pour des effluents gazeux d'incinérateurs de déchets, et peut s'appliquer plus généralement pour des sources d'émissions fixes, comme peut l'être le chauffage domestique au bois. Ainsi, la mesure des particules de type PM₁ à PM₁₀ est a priori possible via cette méthode.

• **La pesée :**

Deux possibilités sont offertes pour effectuer la mesure. Une première consiste en la pesée du filtre et de son porte filtre uniquement, auquel cas les dépôts de poussières en amont doivent être récupérés et pesés. La deuxième possibilité propose la pesée du filtre, de son porte filtre et des éléments en amont où s'installent les dépôts. Ainsi ces derniers seront directement pris en compte. Selon la plage de mesure de la balance à disposition, le choix se tournera vers l'une ou l'autre des possibilités.

Avant le prélèvement, les éléments à peser sont placés dans une étuve pendant au moins une heure, à 180°C. Les filtres ou flacons de pesées doivent être refroidis dans un dessiccateur pendant au moins 4 heures. Les flacons contiennent les dépôts recueillis en amont du filtre par rinçage à l'eau ou à l'acétone des éléments « salis ».

La pesée doit s'effectuer dans les 3 minutes suivant le retrait du dessiccateur des éléments à peser. La relevée de masse se fait au bout de 1 puis 2 puis 3 minutes. Une augmentation trop conséquente entraîne la remise de l'échantillon dans le dessiccateur pendant au moins 4 heures, suivi d'une nouvelle pesée.

Après pesée, les éléments sont placés dans une étuve à 160°C pendant au moins une heure, puis replacés à température ambiante dans un dessiccateur.

- **Incertitudes sur les mesures :**

Beaucoup d'incertitudes de mesures peuvent fausser les résultats ou les rendre peu fiables. De manière générale, il faudra veiller à bien respecter le mode opératoire choisi suite à la considération de l'équipement de prélèvement et des filtres utilisés. Les principaux facteurs d'incertitudes sont :

- L'étanchéité du dispositif : la présence de fuites peut fausser tous les résultats et doit donc être inférieure à 2% du débit de prélèvement.

- Le taux d'isocinétisme : la vitesse du flux de gaz doit se situer entre -5% et +15% de la valeur théorique avant d'être considérée comme facteur de mesures faussées.

- La source de prélèvement : certaines sources d'émissions de particules ne réunissent pas les paramètres nécessaires au respect de la norme, par leur emplacement par exemple, et empêchent donc une prise de mesure fiable et basée sur la méthode NF EN 13284-1.

- Dépôts de poussières sur des éléments non pesés en amont du filtre : ces dépôts peuvent représenter entre 10 et 30% du total des particules mesurées, ce qui est loin d'être négligeable. Tous les éléments en amont du filtre doivent être pesés même si finalement, il paraît difficile recueillir 100% des particules émises.

- Erreurs sur la pesée : la pesée est fortement influencée par la température à laquelle elle est opérée. De plus cette température doit être stable, les variations climatiques n'étant pas exemptes de tout reproche quant à une éventuelle mesure faussée. Il conviendra également de travailler à pression constante.

- Perte de fibres du filtre : au début du prélèvement, la possible perte de fibres des filtres peut affecter l'incertitude de mesure.

1.2. Méthode allemande/autrichienne DIN+ :

Etant donné la grande similarité de cette méthode avec la précédente et le manque de détails à son propos, nous la détaillerons moins.

- **Principe**

Particulièrement utilisée en France, cette méthode consiste à prélever la fraction solide des particules sur un filtre chauffé placé à l'extérieur du conduit. Elle est simple d'utilisation mais présente quelques inconvénients. En effet, elle est une version simplifiée de la méthode plus élaborée figurant dans la NF EN 13284-1 vue précédemment. Seulement, les influences des simplifications sur la qualité de la mesure sont à ce jour peu connues et ne sont pourtant peut-être pas à négliger. Ensuite, la mise en œuvre de cette méthode est a priori décrite dans la norme TS 15883 mais avec un certain nombre d'informations manquantes. Enfin, c'est uniquement la fraction solide qui est déterminée, au détriment de la condensable.

- **Domaine d'application de la méthode/granulométrie :**

Cette méthode fait suite à des discussions au sein du Comité Européen sur le choix d'une méthode de mesure des particules issues du chauffage bois commune à toute l'Europe. Ce sont donc notamment les particules pouvant aller des PM₁ aux PM₁₀ qui sont concernées.

- **Incertitudes sur les mesures :**

Elles proviendront majoritairement des caractéristiques de la plate-forme d'essai qui aura tendance à influencer la fidélité à la méthode, de la manière de gérer la combustion et de la mise en œuvre de la méthode de mesurage (charge, humidité, température du foyer et du combustible).

1.3. L'Impacteur Electrique Basse Pression (ELPI)



Figure 13 : Photographie de l'ELPI

- **Principe :**

La société DEKATI a commercialisé un appareil (Figure 13, source : Mode d'Emploi de l'ELPI) conçu par l'Université de Tampere en Finlande. Cette technologie permet en temps réel la mesure de la distribution de taille et de concentration de particules dispersées dans un gaz, et ce, dans une large plage comprise entre 30 nm et 10 μ m de diamètre par le phénomène physique de l'impaction. Elle possède 12 étages d'impaction. Chaque particule contenue dans l'échantillon gazeux recueilli est chargée électriquement et percute un impacteur à étages les fractionnant selon leurs diamètres aux travers de 12 étages (Figure 14, source : Mode d'Emploi de l'ELPI). Ces derniers sont composés chacun de deux plateaux, dont un doté de petits orifices par lesquels pénètrent les particules pour effectuer un virage serré et atteindre ainsi les plateaux inférieurs. Seulement, la haute vitesse du gaz est telle que toute particule dont le diamètre aérodynamique est supérieur au diamètre de coupure de l'étage voit son inertie ne pas lui permettre de franchir l'obstacle et donc de s'impacter sur le deuxième plateau, à savoir celui de collection.

Les diamètres de virages de coupure, appelés ajutages, étant de plus en plus petits au fil des étages, nous comprenons bien qu'un fractionnement des aérosols va se faire progressivement, nous amenant au dernier étage à ne capter que les plus petites particules restantes soit les nanoparticules (Figure 15, source : Mode d'Emploi de l'ELPI). Un logiciel de traitement fourni avec l'appareil sert à déterminer de manière fiable le nombre de particules captées à chaque étage de l'impacteur. Les deux avantages majeurs offerts par cette technologie sont la détermination en temps réel de la distribution des aérosols de chaque taille en unité numérique et de pouvoir récupérer les particules collectées afin d'en effectuer des analyses physico-chimiques.

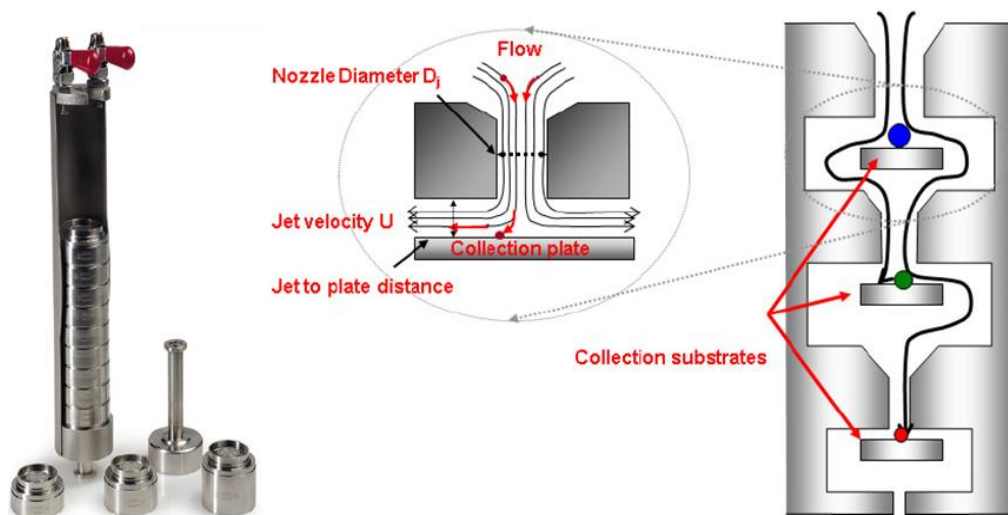


Figure 14 : Impacteur et son principe de collecte des particules

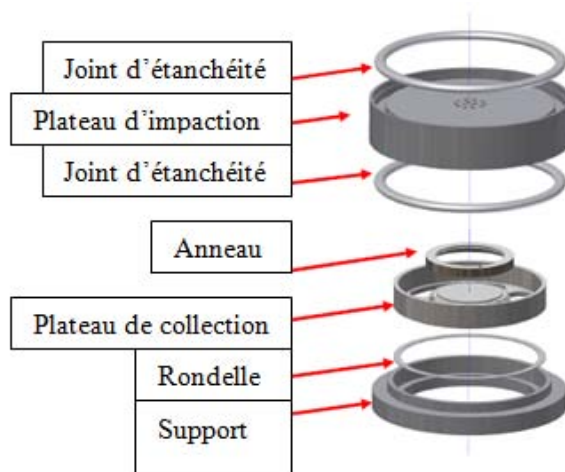


Figure 15 : Composition d'un étage de l'impacteur

- **Conditions de mesures**

Matériau :

L'ELPI est en acier inoxydable. L'impacteur pèse 5 kg et a pour dimension une longueur de 300 mm pour un diamètre de 65 mm.

Dilution :

Pour les prélèvements des émissions lors des essais de combustion dans les appareils de chauffage au bois, l'analyse par ELPI doit être réalisée par le biais d'un système de dilution chauffé pour éviter la saturation systématique de l'appareil lors de ce genre d'essais. La dilution est effectuée à un taux constant à l'aide d'air filtré et chauffé.

Température :

Que ce soit la température ambiante ou celle de l'équipement, elle doit être comprise entre 0 et 200°C.

Débit de prélèvement :

Il doit être compris entre 10 et 30 l/min.

- **Domaine d'application de la méthode/granulométrie :**

Comme précisé plus haut, cette méthode couvre la captation d'une large gamme de particules pouvant aller de 30 nm à 10 µm de diamètre. En l'occurrence, les particules fines issues du chauffage au bois sont mesurables par cet appareil.

1.4. Impacteur manuel



Figure 16 : Impacteur manuel DEKATI

- **Principe :**

L'impacteur manuel (Figure 16, source : Mode d'Emploi Impacteur Manuel), aussi commercialisé par DEKATI, repose exactement sur le même principe que l'appareil ELPI vu précédemment. Simplement, le mouvement des particules de l'échantillon de gaz recueilli n'est pas stimulé par une charge électrique, et le nombre d'étage est réduit au nombre de trois ou quatre selon la configuration. Si avec l'ELPI, une douzaine de tailles de particules étaient déterminables en nombre, l'impacteur manuel nous permet de déterminer la masse des quatre tailles principales d'aérosols les plus fréquemment référencées contenues dans un échantillon de gaz de volume connu. Ces quatre tailles principales d'aérosols sont évidemment les PM₁₀, les PM_{2.5}, les PM₁ et les nanoparticules. Un premier étage récoltera toutes les particules dont le diamètre est supérieur ou égal à 10 µm, un deuxième captera toutes celles dont le diamètre est compris entre 2,5 et 10 µm, un troisième piègera les aérosols compris entre 1 et 2,5 µm, et un plateau final dit de filtration collectera la fraction de particules considérée comme nanoparticule. Finalement, le principe de l'impacteur manuel est la classification inertielle puis l'analyse gravimétrique des aérosols.

- **Conditions de mesure :**

Matériau :

L'impacteur manuel est en acier inoxydable. Il pèse 2,4 kg et a une longueur de 150 mm pour un diamètre de 65 mm.

Température :

Que ce soit la température ambiante ou celle de l'équipement, elle doit être comprise entre 0 et 200°C.

Débit de prélèvement :

Il doit être compris entre 10 et 30 l/min.

- **Domaine d'application de la méthode/granulométrie :**

Quatre étages différents permettent de capter les PM₁₀, les PM_{2.5}, les PM₁ et les nanoparticules. Les particules issues de la combustion du bois sont donc concernées par cette méthode de mesure.

1.5. Tunnel à dilution (NS 3058-2)

- **Principe :**

Les gaz provenant de la chaudière sur laquelle sont effectuées les mesures sont recueillis et dilués avec de l'air ambiant à l'aide d'un tunnel à dilution. Le but principal est de simuler une situation réelle de diffusion des particules dans notre atmosphère, puis d'en mesurer la contribution à la pollution. Les particules sont collectées par la suite à l'aide de deux filtres en fibres de verre placés en série. Leur masse est déterminée après l'évaporation totale de l'eau s'y rattachant. Cette technique est très utilisée dans les pays nordiques, ceci expliquant la norme norvégienne s'y référant.

- **Conditions de mesures :**

Voici le dispositif de prélèvement des particules sur filtres faisant suite au tunnel à dilution (Figure 17, source : NS 3085-2 page 3) que nous verrons par la suite :

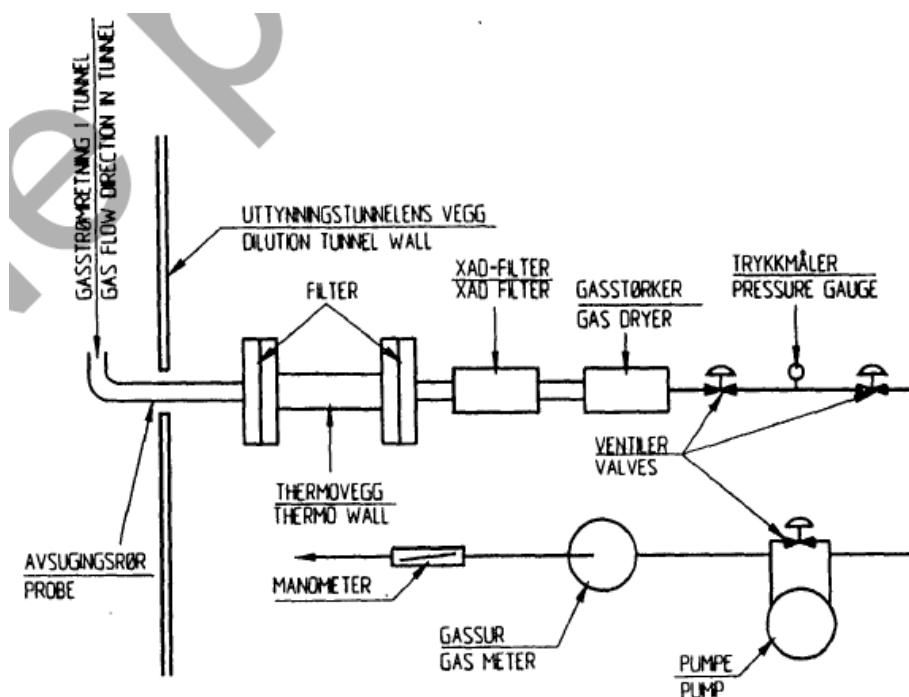
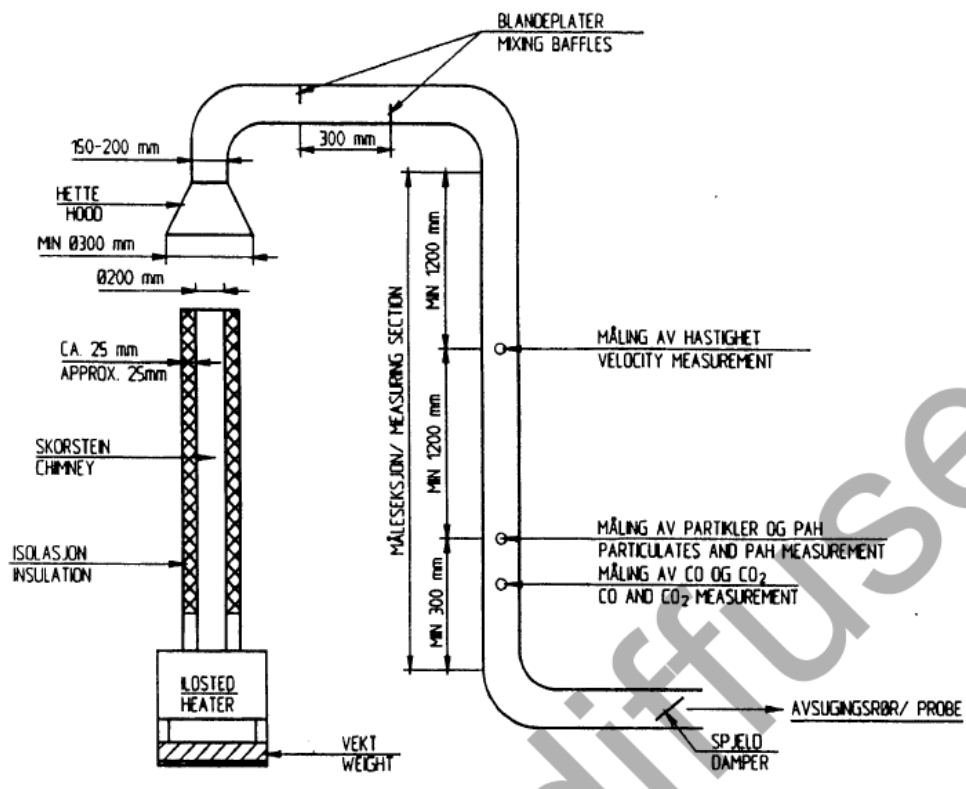


Figure 17 : Schéma de principe du dispositif de prélèvement sur filtres

- La sonde : elle est placée en entrée du dispositif ci-dessus et est faite soit d'acier inoxydable et homogène, soit de verre. Son diamètre doit être de l'ordre de 10 mm pour une longueur pouvant aller de 0,3 à 0,6 mètre.
- Le tube de Pitot : un tube de Pitot standard est utilisé pour déterminer et contrôler la vitesse du flux de gaz dans le tunnel à dilution.
- La jauge de pression : elle fait partie de l'ensemble constituant le tube de Pitot et inclut un manomètre ou un instrument similaire permettant de contrôler la pression.

- Ci-dessous le tunnel à dilution (Figure 18, source : NS 3085-2 page 5) permettant de recueillir le flux de gaz où l'échantillon va être prélevé :



- La hotte : faite d'acier, son diamètre minimum d'admission des gaz ne pas se situer en dessous de 300 mm.
- Le coude à 90°C : avec son diamètre situé entre 150 et 200 mm, cet élément en acier assure la liaison entre la hotte où les gaz se mélangent à l'air ambiant et le reste du dispositif.
- Cloisons (Mixing baffles) : ce sont des demi-cercles d'acier attachés perpendiculairement à la canalisation, l'un couvrant la moitié haute, l'autre la moitié

basse. Ils doivent être séparés d'environ 300 mm comme l'indique la figure ci-dessus.

- Les canalisations droites : faites en acier, leur diamètre est compris entre 150 et 200 mm. La partie suivant le deuxième coude à 90°C correspond à la section d'échantillonnage. Deux trous assez grands pour laisser passer les tubes Pitot sont percés pour mesurer la vitesse du flux gazeux. Les taux de CO et de CO₂ sont également déterminés.

- Le système d'aspiration : il sert à extraire les gaz du tunnel de dilution en agissant sur leur vitesse et leur taux de dilution.

- **Domaine d'application de la méthode/granulométrie :**

Cette méthode est destinée à déterminer les émissions de particules provenant des gaz issus du chauffage domestique au bois. Ce sont donc principalement les particules fines qui sont concernées en termes de granulométrie.

- **Méthode de mesure :**

Avant toute manipulation, les filtres doivent reposer dans un dessiccateur durant 24 heures puis être pesés avant utilisation. Une fois le dispositif mis en place et le test de fuite effectué, la mesure peut commencer. Les filtres ne doivent pas avoir une température supérieure à 35°C tandis que le volume d'échantillon de gaz à recueillir doit être de 0,015 m³/min, sachant la vitesse moyenne du flux de 3,33 m/s dans le tunnel et le diamètre intérieur de 10 mm.

Après le prélèvement, chaque filtre est transféré dans un récipient, puis conditionné dans un dessiccateur à température ambiante durant 24 à 36 heures. Vient alors la pesée devant s'effectuer jusqu'à obtenir une masse ne variant plus à 0,5 mg près.

En parallèle, les porte-filtres sont rincés à l'acétone, la solution étant alors recueillie dans un troisième récipient. Une mesure en volume et en gravimétrie de la solution doit être effectuée à 0,5 gramme près. Ensuite, une évaporation totale en conditions de température et de pression ambiantes doit être opérée, ceci donnant suite à une mise en dessiccateur des particules recueillies durant 24 à 36 heures, puis à leur pesée à 0,1 g près.

La masse totale de particules émises durant l'essai correspond à la somme des trois masses mesurées précédemment regroupant les particules des deux filtres et celles déposées sur les porte-filtres. D'autres grandeurs comme la concentration en particules, le taux d'émission ou le volume de gaz prélevé peuvent être déterminées grâce aux mesures effectuées tout au long du protocole.

2. Méthode de mesure de la fraction condensable des particules :

2.1. Méthode EN TS 15439 : 2006

- Principe :

Cette norme fait partie des références mentionnées dans le rapport PEREN²BOIS pour déterminer la fraction condensable des aérosols, chose impossible avec les méthodes vues précédemment servant uniquement à mesurer la fraction solide. En effet l'EN TS 15439:2006 présente une méthode de mesure et d'analyse des goudrons et des particules générés lors la combustion de biomasse. L'intégrale de la norme ne nous intéresse pas. Par contre, la partie relative à la mesure de la fraction condensable des particules à l'aide de barboteurs est intéressante et constitue l'une des méthodes principales à ce sujet. Un certain nombre de barboteurs contenant de l'isopropanol sont placés en série à différentes températures (Figure 19, source : norme EN TS 15439 :2006). Les propriétés de la solution utilisée vont provoquer la condensation des gaz toxiques lors de leur passage dans le dispositif de mesure, les piégeant ainsi sous forme solide dans cette même solution. La norme prévoit l'analyse de la composition des particules par l'intermédiaire de la technologie GCMS (Gas Chromatograph Mass Spectrometer). Ceci nous intéresse moins que d'obtenir une réelle masse ou un réel nombre d'aérosols. C'est donc simplement par évaporation de la solution d'isopropanol contenant les condensables que nous allons pouvoir obtenir nos éléments à peser, ceci présentant un double intérêt. Le traitement de l'échantillon est rapide et facile, et l'isopropanol n'est pas cancérigène.

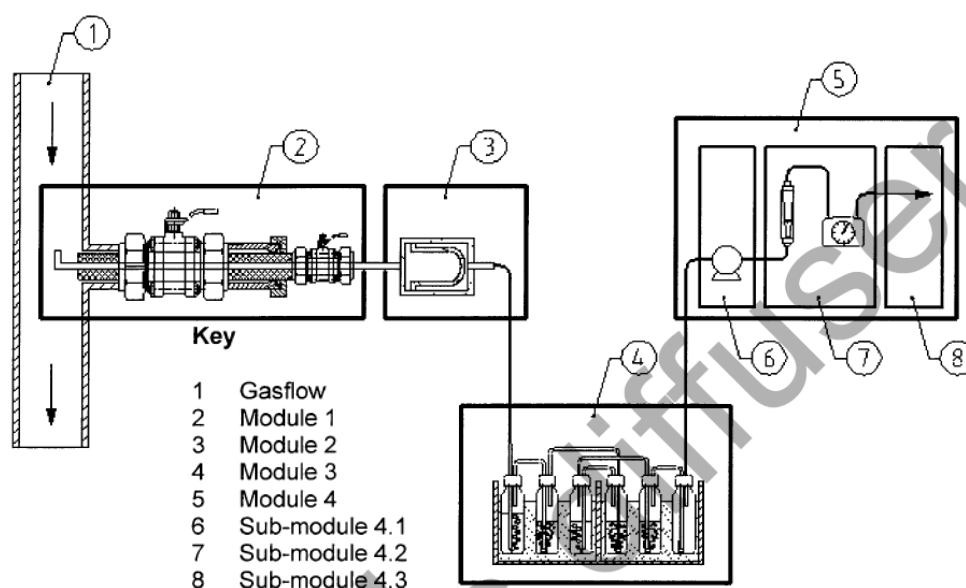


Figure 19 : Schéma de principe du dispositif de mesure de la norme EN TS 15439 :2006

Le module nous intéressant sur la figure ci-dessus correspond à la légende 4 appelée « module 3 ». C'est ici que l'on va retrouver nos six barboteurs servant à recueillir les condensables. Nous ne détaillerons pas le reste du dispositif qui nous intéresse moins ici, un système de pompe, de mesure du volume de gaz et de la température étant évidemment présents similairement aux méthodes vues précédemment.

- **Conditions de mesures :**

Les barboteurs utilisés sont standards avec une longueur de 200 mm pour un diamètre de 40 mm ou de 55 mm selon leur contenance pouvant être respectivement de 100 ml ou de 250 ml. Deux configurations sont possibles pour le module de barboteurs.

- Configuration standard : les barboteurs 1, 2 et 4 (de gauche à droite) sont portés à une température située entre 35 et 40°C, tandis que les 3, 5 et 6 à une température située entre -20 et -15°C.
- Configuration alternative : elle est surtout utilisée quand les variations de pression sont brutales ou quand, pour des raisons de sécurité, la pression doit être maintenue basse. Dans cette configuration, les quatre premiers barboteurs sont portés à une température située entre 35 et 40°C. Les deux autres sont portés entre -15 et -20°C.

Les jeux de températures proposés par la norme ainsi que le nombre de barboteurs utilisés servent à s'assurer de la totalité du piégeage des particules condensables.

- **Domaine d'application de la méthode/granulométrie :**

Cette méthode sert à déterminer la quantité de goudrons et de particules générés par les gaz issus de la biomasse. Les particules issues de la combustion du bois font donc partie intégrante du domaine mesurable par l'EN TS 15439:2006. La partie du dispositif nous intéressant ne capte que la fraction condensable des particules.

- **La pesée :**

L'isopropanol contenu dans les barboteurs avec les condensats de particules est vidé dans un récipient. Chaque barboteur est alors rincé trois fois à l'isopropanol, les rinçats étant ensuite versés dans le même récipient que l'isopropanol des barboteurs. La pesée se fait alors comme ceci :

- Un bécher de 100 ml est pesé avec une balance de précision 0,1 mg
- Le contenu du récipient d'isopropanol est versé dans un grand cristalliseur plat
- On laisse l'évaporation de l'isopropanol se faire à température ambiante sous une hotte
- Une fois la totalité de l'isopropanol évaporé, on rince trois fois avec 20 ml d'isopropanol que l'on verse dans le bécher de 100 ml pesé au préalable
- On laisse de nouveau évaporer à sec à température ambiante sous hotte
- Le bécher est placé dans un dessiccateur durant 24h, puis on procède à la pesée à 0,1 mg près.

2.2. Méthode américaine US EPA5H

En raison du manque d'informations à son propos, nous ne détaillerons pas cette méthode qui somme toute, reste assez similaire à la précédente. Elle repose sur l'utilisation d'un filtre chauffé à 120°C et de barboteurs remplis d'eau placés dans un bain d'eau glacée à 0°C. Les échantillons collectés sont alors extraits au dichlorométhane, les deux phases séparées étant ensuite évaporées à sec. Les indices pondéraux sont déterminés sur les extraits secs obtenus après évaporation. Le PEREN²BOIS a préféré se baser sur la EN TS 15439 :2006 plutôt que la US EPA5H notamment pour la nocivité du dichlorométhane utilisé pour l'extraction des échantillons.

- PARTIE 5 - IMPACT DE LA METHODE DE MESURE

La partie précédente nous montre bien que l'appareil de mesure change les résultats obtenus. Mais il n'y a pas que ça. La méthode de mesure influence elle aussi drastiquement les résultats. On peut se demander à juste titre pourquoi la combustion du bois possède de nombreux facteurs d'émissions, allant de quelques dizaines à plus de mille (figure 20, source :Nussbaumer).

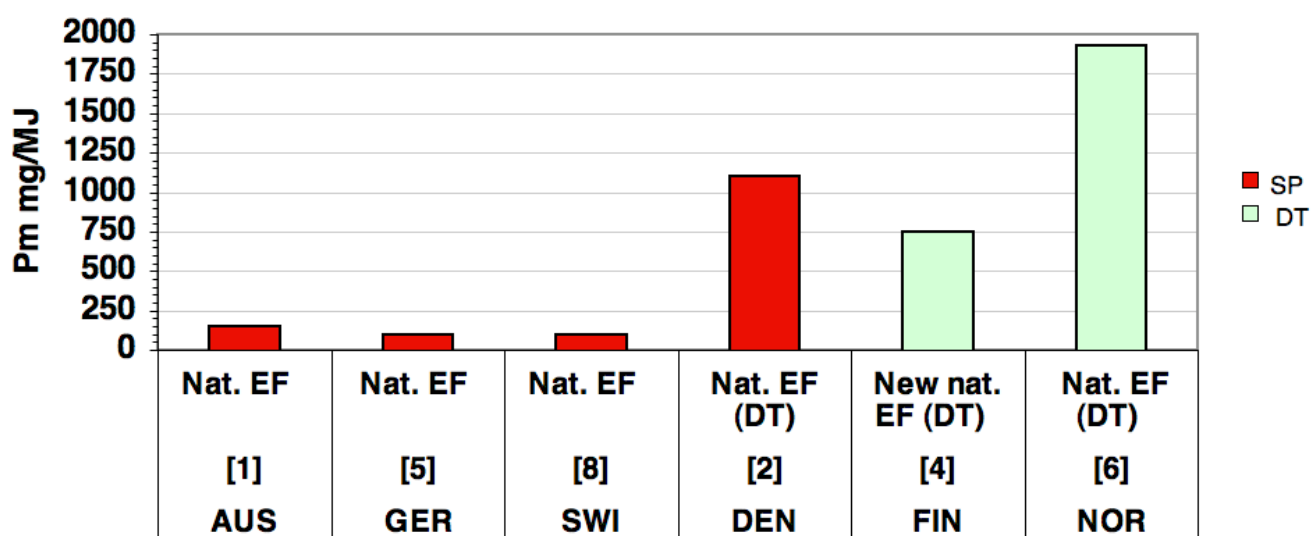


Figure 20 : Facteurs d'émissions du bois selon les pays

On voit bien sur ce schéma l'ampleur du problème. Tous ces pays possèdent exactement le même type d'appareil, et pourtant les valeurs des facteurs d'émissions sont extrêmement variables. Sur ce schéma on trouve à chaque fois des vraies valeurs, déterminées par voie scientifique, mais de manières totalement différentes. Lorsqu'on veut comparer les émissions du bois à d'autres carburants, ou alors simplement comparer les valeurs d'un pays à l'autre, cela devient impossible. Il s'agit donc une porte ouverte à l'incertitude et à l'erreur.

Nous allons essayer à travers cette partie de trouver des éléments de réponses qui pourraient expliquer cette variation.

Les trois schémas suivant (figure 21 et 22 et 23) sont là pour nous apporter quelques éléments de réponse quant à cette dispersion gigantesque.

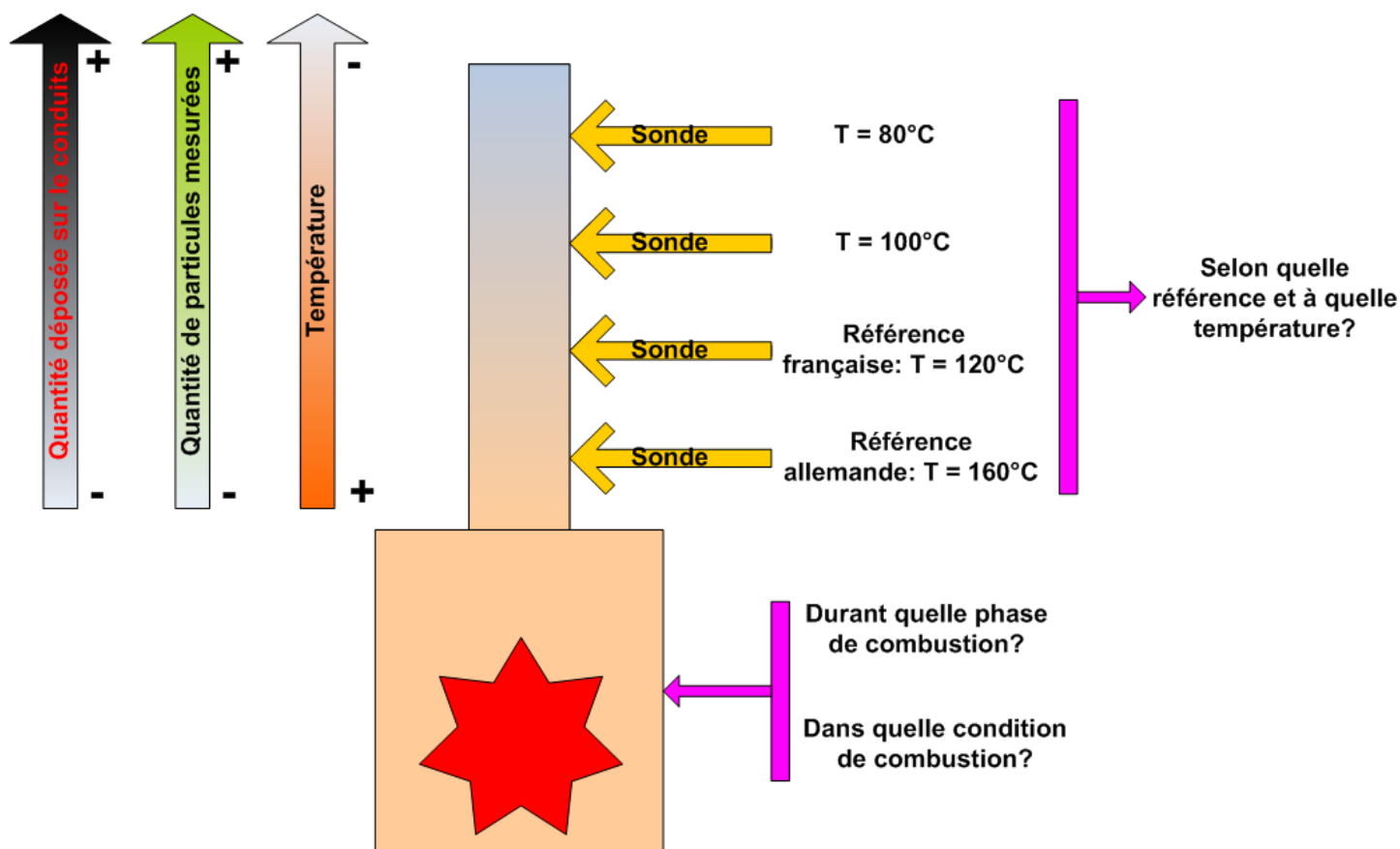


Figure 21 : Différentes sources d'impacts sur les résultats

On se rend bien compte à travers ce schéma qu'on ne mesure jamais exactement la même chose puisqu'il y a énormément de paramètres à contrôler. De plus, comme on ne connaît pas de loi permettant de transférer un résultat mesuré à 160°C avec un débit de fumée à 4.4m/s à ce qu'on aurait trouvé si on mesurait à 120°C avec un débit de fumée de 1m/s par exemple, on ne peut donc pas comparer deux résultats obtenus avec des méthodes différentes. En revanche, si on veut comparer des mesures, il faudrait au moins que tout le monde se base sur une référence température/système de mesure similaire. On conserverait une variation de résultat, mais elle serait nettement plus resserrée. Ceci est une des solutions envisageables.

La seconde serait de parvenir à créer une loi permettant de déterminer les résultats que l'on aurait obtenus si on avait mesuré autrement. Cette seconde solution nous paraît particulièrement complexe, vu la diversité des impacts. De plus, si on ajoute à toutes les incertitudes de mesure que l'on peut avoir une simple approximation de ce qu'on aurait, que devient la véritable valeur de ce nouveau résultat ? Il sera sans doute trop peu précis pour en tirer quoi que ce soit. Quoi qu'il en soit, cela reste une piste de recherche.

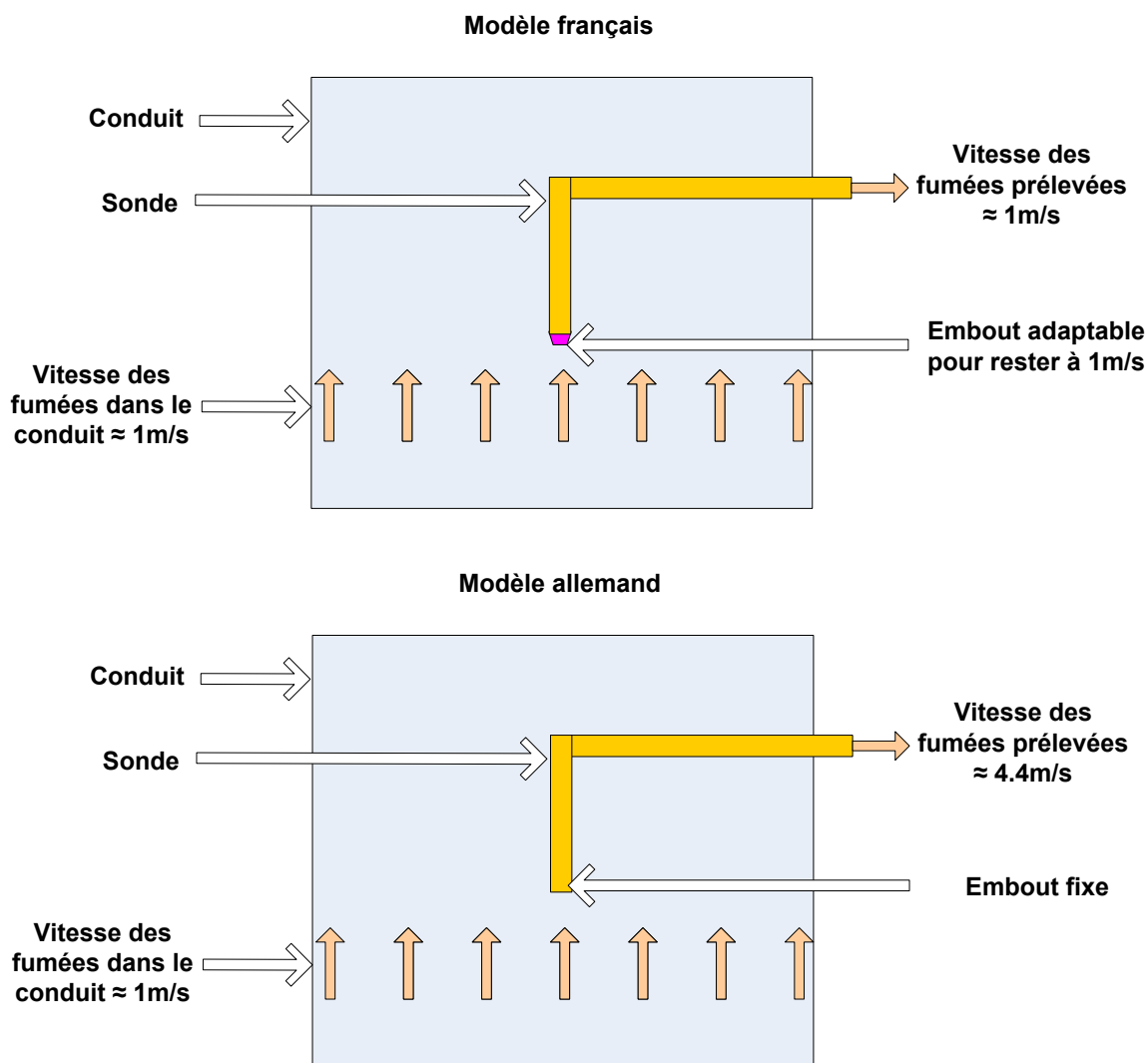


Figure 22 : L'influence du débit

Sur cette figure 22 on perçoit un nouveau point d'impact sur les résultats. En effet, la France travaille en quasi iso-cinétique (c'est-à-dire que la vitesse de mesure est quasiment la même que la vitesse des fumées) alors qu'en Allemagne, on ne prête pas attention à ce critère.

Certaines études ont démontré que l'influence du débit restait relativement faible, mais l'influence reste présente.

On pourrait aussi parler des tests des ramoneurs. En Allemagne, ils suivent la norme TÜV, qui les oblige à faire des tests de vingt minutes. Or on s'aperçoit en regardant les normes françaises que la durée de l'essai doit au moins être d'une heure à une heure et demie (selon les cas). On reste donc au mieux au tiers de temps nécessaire pour avoir un résultat significatif.

En France, le suivi des ramoneurs, de leur activité et de leur méthode reste un brouillard épais. Il est donc impossible de se baser sur des chiffres qui sont donnés sans indication de la méthode utilisée.

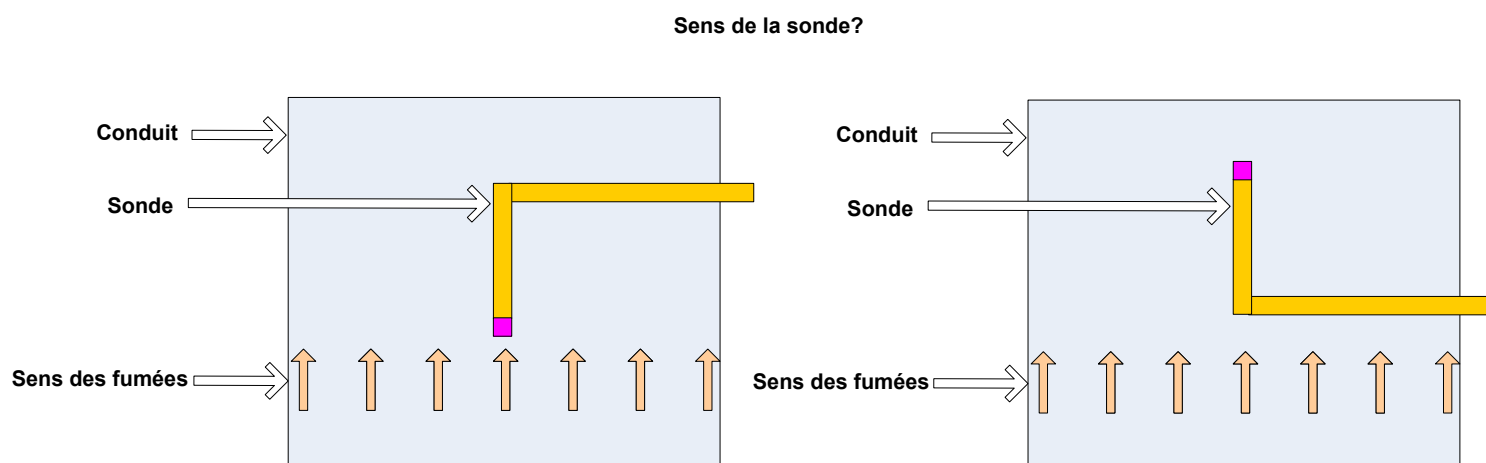


Figure 23 : L'influence due à la sonde

Quand la sonde est placée la tête en haut, elle joue le rôle de pré-filtre. On ne mesure alors plus du tout la même chose qu'avec une sonde tête en bas. On sélectionne finalement un type de particules qu'on ne mesurera pas. Il faut donc pour que des essais soient comparables que les sondes soient placées de la même manière. Il en va de même pour comparer des résultats de mesure entre eux, il faudra que les deux tests requièrent le même positionnement de sonde.

- PARTIE 6 - LE CHAUFFAGE AU BOIS ET LES PARTICULES

1. Bilan des études

Nous avons lu plusieurs rapports de campagne de mesures. Nous présenterons ici les résultats obtenus par deux organismes : Airparif et Particul'air. Airparif est un organisme qui surveille la qualité de l'air à Paris. Pour se faire, ils possèdent plusieurs stations de mesure. Particul'air est une campagne de mesure en zone rural. Son but était de surveiller la qualité de l'air de neuf communes réparties d'ouest en est sur la France, afin de déterminer ou déceler des problèmes de qualité de l'air en zone rurale. Chaque commune était donc équipée d'une station de mesure.

La figure 24 présente un tableau récapitulant leurs résultats, en termes d'impact du chauffage au bois.

Part du chauffage bois dans les émissions

Source	Part du bois pour les PM10	Part du bois pour les PM2,5	Part du bois pour les HAP
Airparif	22%	32%	30%
Particul'air	21%	34%	66%

Nota bene: Le rapport Particul'air utilise ces ratios de la part du bois dans les émissions, mais ces ratios sont déterminés par le CITEPA

Figure 24 : Bilan des études

Nous pouvons observer ici que ces deux études expriment une part du bois quasi similaire au niveau des PM10 et PM2.5. Mais, il faut savoir que ces deux rapports se basent plus ou moins sur les rapports du CITEPA. Au niveau des HAP, Particul'air trouve une part du bois deux fois plus importante que Airparif.

Afin de conserver un œil critique à la vue de ces résultats, nous allons les analyser et tenter de les comprendre un peu plus en détails.

Tout d'abord, les deux campagnes de mesure se déroulent sur des places géographiques opposées (rurale et urbaine). Cela influencera sûrement les résultats puisque la part de chauffage en bois en campagne ou en ville est sûrement différente.

Si l'on regarde à nouveau la figure 10 (schéma de Gaegauf présent aussi en annexe 1), on se rend compte que ces deux campagnes font des prélèvements au stade atmosphère. Il devient tout de suite plus complexe de relier les résultats à une source, car cette figure montre bien que ce stade est influencé par les incendies de forêts où autre combustion de biomasse hors chauffage. Ici, les deux études ne tiennent pas compte de ce phénomène. On peut pourtant penser que son influence est importante, car il s'agit de combustions absolument non maîtrisées et donc très polluantes.

Ensuite, on sait aussi que les particules et le « nuage de polluant » émis par un chauffage au bois (ou par une quelconque source d'émission) se déplacent. C'est-à-dire qu'on peut très bien mesurer dans une ville un regroupement dû à un climat particulier sur un coin géographique particulier les émissions de la ville ajoutées à celles des villes alentours. Certaines zones peuvent effectivement être des points où les pollutions s'accumulent, ou l'inverse, où elles circulent très vite vers d'autres zones. En effet, le rapport Particul'air trouve encore bien des embruns marin à Maîche (Doubs), ce qui prouve que les particules voyagent. Ce rapport montre aussi l'influence de la géographie du site, avec des villages encaissés dont les concentrations sont très étonnantes.

On peut aussi remarquer que leurs méthodes de mesures sont différentes, et donc, pour toutes les raisons vues dans les parties précédentes, difficilement comparables.

Nous pourrions aussi parler des méthodes de calculs. Particul'air se sert de rapports se basant sur la mesure de la concentration d'espèces (Titane, aluminium, silicium, ...). Voici un exemple de formule utilisée :

$$[\text{Dust}] = 2.2 * [\text{Al}] + 2.49 * [\text{Si}] + 1.63 * [\text{Ca}] + 2.42 * [\text{Fe}] + 1.94 * [\text{Ti}]$$

On peut se demander ce que valent vraiment ces rapports, dont les coefficients ne sont pas expliqués.

En bref, après étude du sujet des particules, nous ne sommes pas convaincus par la pertinence des résultats de ces études.

2. Carbone élémentaire et carbone organique

On peut distinguer deux types de carbones. Le carbone élémentaire est un carbone cristallin. Il y a deux types de carbones élémentaires, le graphite et le diamant. Le carbone organique est quant à lui moins cristallisé. Si l'on somme ces deux familles de carbones on trouve alors le carbone particulaire total (CT).

Apparemment, ces deux types de carbone auraient des effets différents sur la santé, l'organique serait beaucoup plus néfaste. Cela nous intéresse donc particulièrement puisque dans le cas de la combustion du bois, on rejette ces deux types de carbones. La combustion de biomasse est donc un émetteur de carbone organique.

Le rapport *Health effects of black carbon* réalisé par la World Health Organization traite ce sujet en détails. Nous voulions à travers cette partie uniquement ouvrir le sujet vers de futurs travaux et problèmes. Nous n'irons pas plus loin sur ce sujet afin de ne pas dénaturer le but de notre étude.

3. Evolution du chauffage bois

3.1. Les solutions de mesure

La solution idéale est toujours en discussion. Mais, il faut savoir que des projets européens se déroulent en ce moment même afin de déterminer une méthode de mesure similaire dans toute l'union européenne. Il faut que celle-ci réponde à de nombreuses contraintes tel que :

- Répétable
- Peu chère
- Précise
- Mesure en nombre

-
- Granulométrie
 - Mesure en continue
 - Protocole facile
 - Large plage de mesure

3.2. Les solutions sur le terrain

Quoi qu'il en soit, que le bois soit très polluant ou non, cela reste une source de pollution de l'atmosphère comme une autre. Rien de plus normal ici, puisque toute activité humaine dégage des pollutions. Ainsi, même si brûler du bois est très peu polluant (où très polluant) cela impacte notre environnement.

Ainsi, de nombreuses thèses se sont réalisées sur un autre problème qui n'est plus d'optimiser une chambre de combustion pour qu'elle pollue moins, mais de capter les polluants émis. A l'heure actuelle, on commence à très bien savoir traiter les fumées pour les rendre le plus propre possible. Mais, cela coûte très cher. Les solutions actuelles sont déjà installées dans les chaufferies de grande puissance (industrie principalement), mais absolument inexistantes dans le milieu du chauffage du particulier.

Effectivement, installer un système cyclone (décrit rapidement plus tard) par exemple revient à quelques milliers d'euro. Sur le budget d'un industriel, dont la chaufferie a coûté plusieurs dizaines de milliers d'euros, ce n'est pas un problème. En revanche rajouter au particulier quelques milliers d'euros revient à augmenter sa note d'achat de plus de 100%.

Les particuliers ne peuvent alors pas se permettre d'acheter de tels systèmes, essentiellement conçus pour des grosses chaufferies. Il existe donc un manque chez les particuliers, qu'il faudra combler dans les années futures par des systèmes efficaces et bon marché.

Le marché du chauffage bois chez le particulier possède un point de contrainte supplémentaire. En effet, il ne faut pas qu'il y ait de l'entretien, ou ne serait-ce qu'une action sur le système. Cela rajoute alors une contrainte sur les systèmes futurs, qui devront nécessiter que peu de maintenance.

Les trois principales méthodes de diminution d'émissions pour les industriels sont les suivantes :

- Le cyclone
- Le filtre à manche
- Le filtre électrostatique

Nous nous appuierons pour expliquer brièvement ces méthodes sur le rapport du Peren2Bois.

Le principe du cyclone est comme son nom l'indique de faire effectuer aux fumées une rotation. En jouant sur la force centrifuge, les particules vont être projetées sur les parois pour ensuite tomber dans un bac à cendres. Un ventilateur peut être combiné à cette méthode pour accélérer le passage des fumées. On ne parlera là plus de cyclone mais de rotateur.

Le filtre à manche est quant à lui un film (différentes matières sont possibles) qui bloqueront les particules dans leur ascension dans les conduits. Il faudra alors décroasser le système soit par de l'air pressurisé (méthode automatique) soit par des changements de filtres (manuel).

Le filtre électrostatique quant à lui utilise un système de chargement électrique des particules, qui iront alors se fixer sur des parties déterminées, qui seront décrassées régulièrement.

Le tableau suivant (figure 25) est là pour présenter les avantages et inconvénients de ces différentes méthodes.

Méthode	Avantages	Inconvénients
Le cyclone	- Procédé purement mécanique donc simple et peu cher - Pertes de charges faibles et constantes - Evacuation des particules simple ou automatisée - Résistant à haute température	- Peu efficace sur les particules fines - Besoin de conditions sèches - Volume important pris par le système
Le tube à manche	- Potentiellement très efficace - Large capacité d'efficacité (aussi bien grosses que petites particules)	- Perte de charge élevée - Besoin de conditions sèches - Plage de température limitée selon la composition du filtre - Contraintes techniques importantes pour l'entretien
Le filtre électrostatique	- Très efficace pour toute taille de particule	- Relié à l'électricité - Prix relativement élevé

Figure 25 : Les principales méthodes de diminution d'émissions, avantages/inconvénients

A l'heure actuelle, on voit tout de même apparaître quelques systèmes pour les particuliers comme le Zumikron. Il s'agit d'un filtre électrostatique qui est sur le marché depuis plusieurs années déjà. Il présente des résultats plutôt bons compris entre 80 et 93% de diminution.

Certains autres produits existent, mais pour réguler les particules et d'autres polluants. Nous pouvons citer la société Fondis avec son Zéro CO. Il s'agit d'un procédé constitué d'un catalyseur contenant des métaux précieux qui seront montés à haute température afin d'oxyder ce qui peut encore l'être. Des filtres sont aussi présents en aval de ce système. Ce procédé permet de bien limiter les émissions de CO et modérément celles des particules (grosses principalement).

- PARTIE 7 - CONCLUSION BIBLIOGRAPHIE

Au fil de cette étude bibliographique basée sur la lecture et la captation d'informations au travers de rapports et de normes tous plus conséquents les uns que les autres, nous pouvons clairement dégager la réelle complexité du débat traitant de l'impact de la combustion du bois sur l'environnement.

Dans tous les esprits, le bois est majoritairement vu comme la solution du futur en termes d'énergie renouvelable et comme l'alternative à beaucoup d'impacts environnementaux. C'est pourquoi, de plus en plus d'appareils au bois font leur apparition dans les foyers domestiques, que ce soit les poêles ou les foyers fermés dont les performances et les rendements ne font que s'améliorer au fil du temps.

Seulement, il est impossible de nier que la combustion du bois engendre des rejets de gaz dont la composition s'avère être, pour une partie non négligeable, toxique et polluante. Les détracteurs de ce matériau renouvelable mettent en avant les émissions de CO, COV, HAP et particules fines. Au départ, la tendance était de regarder systématiquement les PM10. Mais de plus en plus, ce sont les particules fines PM2.5 et PM1 qui attirent l'attention et font l'objet de suspicions. Il a d'ailleurs été constaté que ces dernières sont majoritairement issues de la combustion du bois en secteur résidentiel/tertiaire. Il est évident que l'impact sur la santé de ces types d'émissions est présent et nocif.

Seulement, des doutes subsistent quant à la réelle gravité de ces émissions gazeuses, le fait est que leurs mesures diffèrent d'un pays à l'autre et que finalement, tout constat, positif ou négatif pour le bois, est possible selon l'interprétation que l'on en fait et la manière dont on manipule les chiffres. En effet, pendant que les pays nordiques préfèrent utiliser des tunnels à dilution, dont le coût est particulièrement élevé, les allemands, autrichiens et français se tournent plutôt vers des filtres chauffés ou des impacteurs. Il va de soi que les grandeurs de particules déterminées ne sont évidemment pas les mêmes d'une méthode à l'autre, le nombre, la masse ou encore la concentration étant possibles à déterminer. Une bonne avancée sur la recherche d'une méthode de mesure commune à tous les pays serait souhaitable pour éclaircir le débat et pouvoir tirer des conclusions fiables au sujet du bois, matériau naturel vu comme nocif dans son utilisation en tant qu'énergie.

- PARTIE 8 - PARTIE EXPERIMENTALE

1. Introduction

Afin d'illustrer ce qui a pu être dit précédemment dans ce rapport et de donner un aspect pratique à ce sujet concernant en grande partie la mesure des émissions de particules issues du chauffage domestique au bois, nous avons pu effectuer des essais au sein de l'ENSTIB, sur un foyer fermé. L'objectif de départ était de réaliser deux essais avec trois technologies de mesures différentes à savoir l'impacteur manuel, l'impacteur électrique basse pression et le filtre chauffé. Finalement, un essai a été effectué avec l'ELPI tandis que deux essais ont pu être réalisés avec l'impacteur manuel. Nous n'avons pas pu effectuer un grand nombre d'essais et donc, aucune tendance ne sera dégagée ici (par faute de reproductibilité). En revanche, ces résultats nous ont permis de vérifier une complexité de mesure et les nombreux phénomènes impactant les résultats (voire partie 5 sur l'influence de la méthode de mesure).

Ces expériences nous ont tout de même permis de vérifier certains résultats attendus, qui seront développés dans l'analyse suivante.

2. Protocole

Comme dit précédemment, nous avons donc réalisé des mesures avec deux types d'impacteurs commercialisés par DEKATI, à savoir l'électrique basse pression (ELPI) et le manuel. Deux mesures ont été effectuées avec l'impacteur manuel, sachant que seule la première sera prise en compte car plus concluante et de meilleure qualité. Tandis qu'une seule mesure a été faite sur l'ELPI. Voici le dispositif de mesure nous ayant servi à réaliser nos essais (Figure 26) :

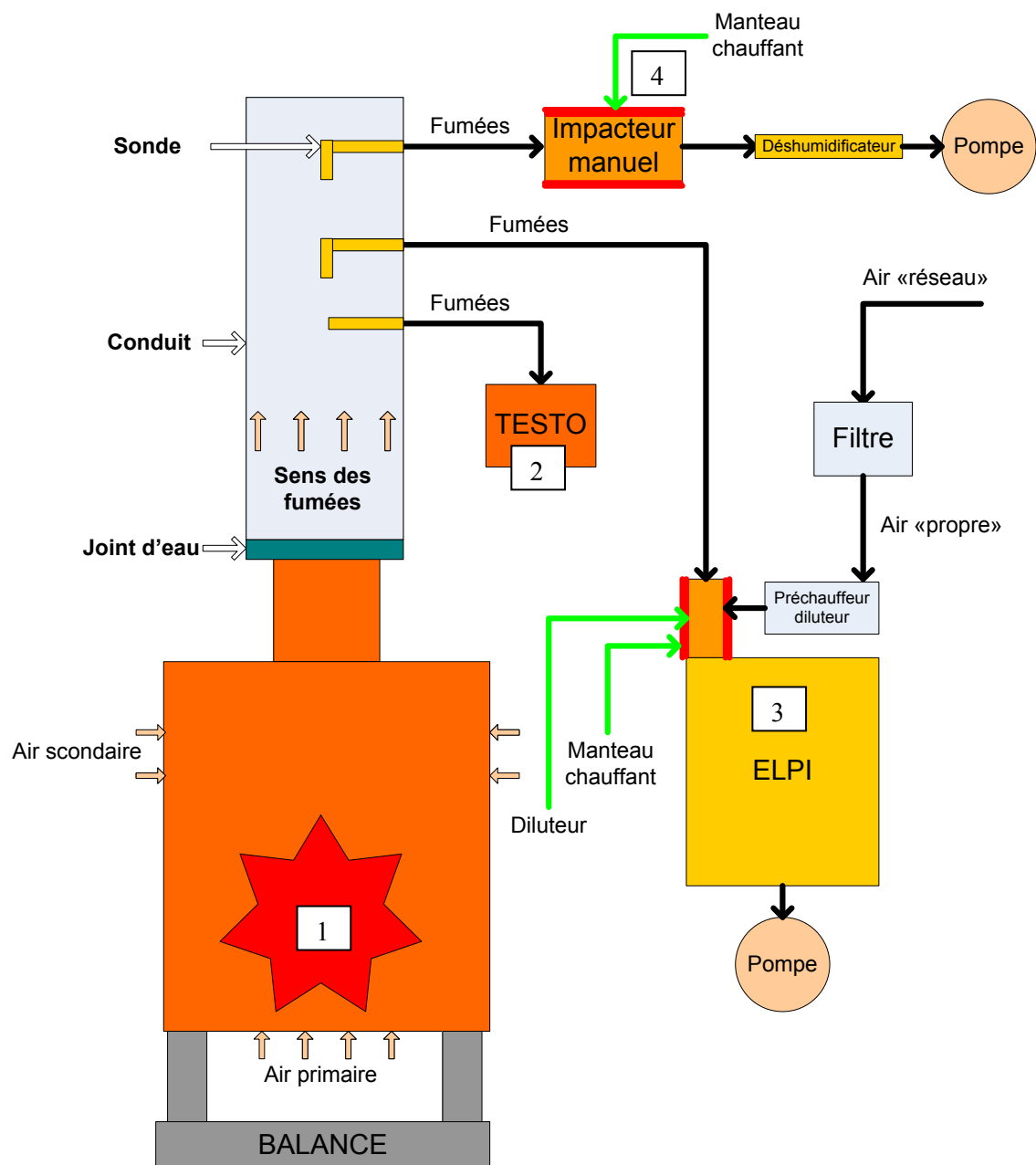


Figure 26 : Schéma des expériences

1 : Les expériences ont été réalisées sur le foyer fermé de l'ENSTIB où un feu avait été allumé au préalable puis maintenu (Figure 27). Une balance placée en dessous du foyer servait à suivre l'évolution de la masse de bois dans la chambre de combustion (Figure 28).

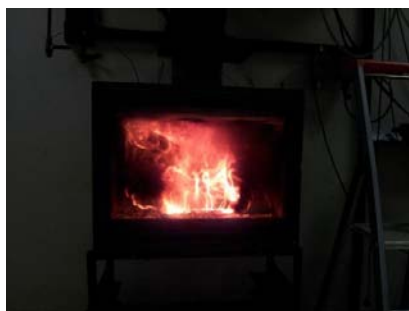


Figure 27 : Foyer fermé de mesure



Figure 28: Foyer fermé avec l'indicateur de masse à gauche

En guise de remarque, sur la figure 27 ci-dessus, nous pouvons observer quelques flammes horizontales (notamment en bas à gauche) correspondant aux gaz brûlés par l'air secondaire formant une deuxième combustion après celle du bois.

Les fumées passent donc dans le conduit et vont se départager vers trois destinations. La première rencontre est celle du TESTO (Figure 26, 2), appareil nous servant à déterminer la composition des fumées. Ce dernier est placé juste à côté du déshumidificateur et de la pompe de l'impacteur manuel (Figure 29).

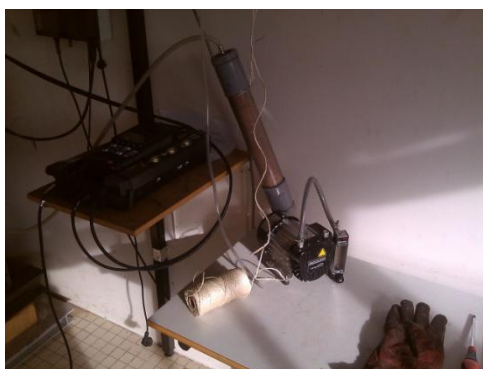


Figure 29 : Testo, déshumidificateur et pompe de l'impacteur manuel

3 : La deuxième destination des fumées est l'ELPI (Figure 30). Elles passent dans un premier temps au travers du diluteur entouré d'un manteau chauffant préchauffé par l'injection de l'air servant à diluer les fumées. L'air, initialement issu du réseau de l'école, est filtré au préalable avant de rentrer dans le préchauffeur. La pompe associée au chargement électrique des particules par l'appareil, stimule le mouvement des aérosols vers le bas au travers de l'impacteur qui recueille au fil de ses douze étages les différentes tailles de diamètre.



Figure 30 : Installation de l'ELPI

3 : Enfin, la troisième et dernière destination est celle de l'impacteur manuel, placé dans un manteau chauffant également. Les particules de chaque taille de référence sont recueillies au travers des quatre étages. Un déshumidificateur ainsi que la pompe stimulant le mouvement des particules sont placés juste après l'impacteur. Finalement, voici notre installation durant les essais (Figure 31) :



4

Figure 31 : Dispositif de mesure

Concernant la mesure réalisée et retenue pour l'impacteur manuelle, nous l'avons effectuée sur 1 heure de temps. Ensuite, chaque composant de l'impacteur, dont les plateaux de collection avec les particules captées, ont été placés en étuve durant 3 heures à 150°C puis en dessiccateur pendant 6 heures, avant d'être finalement pesés.

Pour l'ELPI, la mesure a également duré une heure. Un logiciel enregistre les mesures en continu pour pouvoir les traiter par la suite. Seul le lavage de l'impacteur fait suite à l'expérience. La température de travail voulue était de 150°C, bien qu'elle subisse des fluctuations.

En parallèle, durant l'heure de mesure, le TESTO prend une mesure toutes les 10 secondes de la composition des fumées.

3. Analyse des résultats

3.1. TESTO

Pour le TESTO, nous ne vous présenterons que notre premier essai qui montre des résultats similaires au second. En effet, il n'y a que peu d'intérêt à présenter deux fois la même chose.

Nous avons tracé des courbes caractéristiques, en espérant y retrouver différentes phases (que nous verrons par la suite).

Nous avons choisis de tracer trois courbes après nos essais sur l'impacteur manuel :

- CO corrigé en fonction du temps $\Longrightarrow$ Figure 32
- O₂ et AT (AT = Températures des fumées) $\Longrightarrow$ Figure 33
- Rendement $\Longrightarrow$ Figure 34

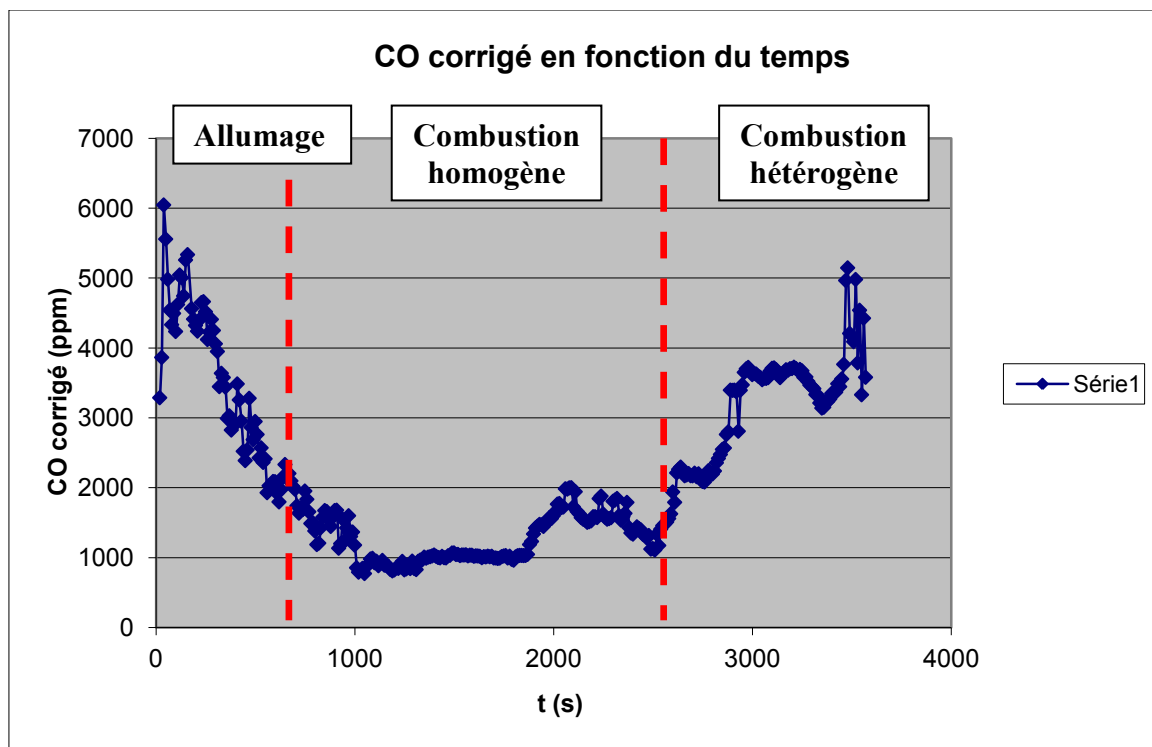


Figure 32 : Courbe du CO en fonction du temps

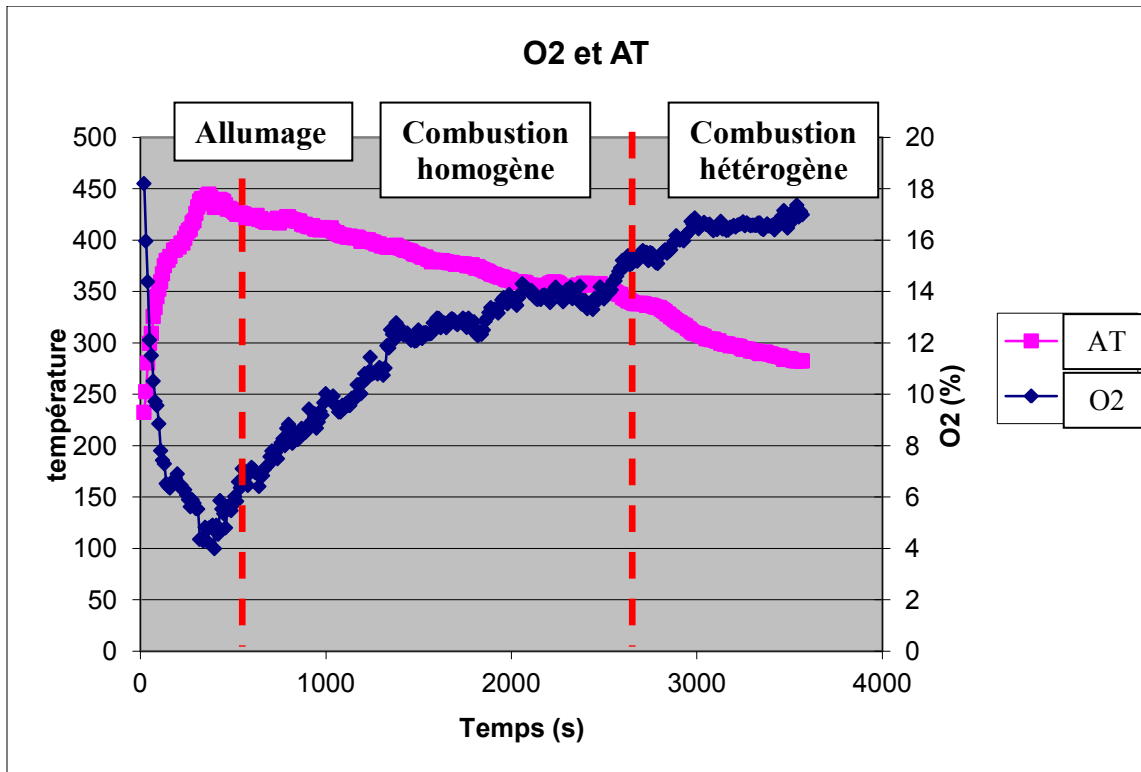


Figure 33 : Courbe de l'O2 et de la température des fumées en fonction du temps

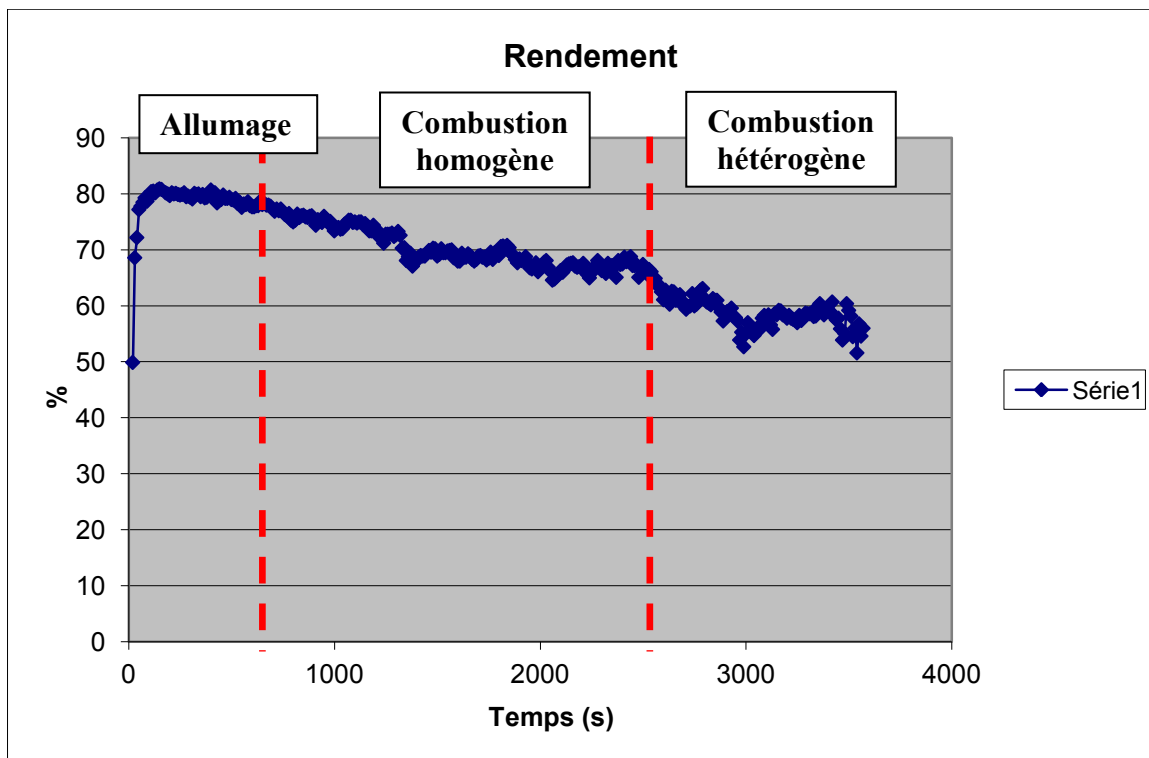


Figure 34 : Courbe du rendement en fonction du temps

On voit bien sur ces courbes la présence des trois phases de combustion du bois (représentées sur les trois figures). Nous allons donc effectuer une analyse étape par étape.

Durant l'allumage, notre CO corrigé à 13% d'oxygène possède des concentrations plutôt élevées. Cela paraît logique puisque la combustion ne fait que démarrer. Cette étape sert à mettre le bois à bonne température, pour qu'il puisse dégager les gaz qui eux brûleront. La combustion est donc mauvaise en ce départ, ce qui augmente la part de CO dans les fumées. Naturellement, comme la combustion ne fait que démarrer, le taux d'O₂ est lui aussi élevé, alors que la température des fumées est elle forcément basse, puisqu'encore très peu de réaction exothermique dans la chambre de combustion. La quantité d'O₂ a tendance à diminuer jusqu'à son minima alors que la température elle augmente jusqu'à son maximum. Le peu de gaz émis par le bois ont de ce fait une grande chance de rencontrer du dioxygène, ce qui implique un rendement élevé (de l'ordre de 78%).

Une fois le bois bien mis à température, on arrive à l'étape de combustion homogène. C'est la phase la moins émettrice de CO puisque cela correspond à la phase où la combustion est la mieux maîtrisée. L'appareil étant dimensionné pour cette phase, notre taux d'O₂ est suffisant et en tendance croissante. Cela paraît logique puisque plus le bois se consume, plus l'excès d'air (et donc d'O₂) est important car il y a de moins en moins de gaz émis par le bois. Contrairement la température des fumées chute légèrement tout le long de cette phase. Cela paraît aussi normal puisque de moins en moins de réaction exothermique se déroule dans la chambre de combustion. Le rendement quant à lui poursuit sa légère chute. Sa moyenne sur cette phase est d'environ 70%.

Arrive finalement la phase de combustion hétérogène. Elle correspond au moment où le bois est déjà en majorité brûlé, et se remet à dégager des gaz plus ou moins par à-coup. Naturellement le taux de CO va ré-augmenter, ainsi que l'O₂ alors que la température des fumées poursuit sa chute. Le rendement devient alors relativement bas, à environ 60%.

Nous pouvons rajouter une dernière courbe à ces trois dernières, qui devrait justifier une fois de plus la présence des trois phases de combustion.

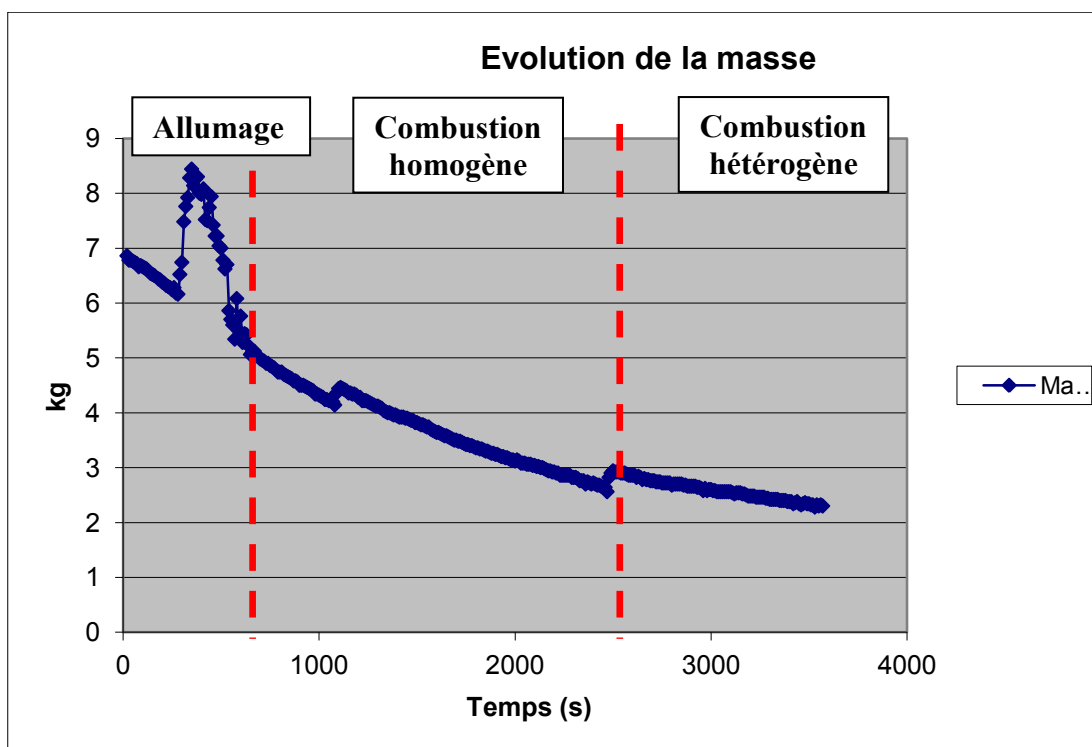


Figure 35 : Courbe de la masse de bois en fonction du temps

Nous retrouvons ici nos trois phases. Elles se reconnaissent sur la figure 35 par des changements de pente de la courbe. Les trois sursauts viennent du fait du joint d'eau. Soit il était en train de se remplir, soit à force de dilater, il est venu en contact de la deuxième partie, qui alors pesait sur la balance. En tout cas, ce bruit n'est pas dérangeant, puisqu'on s'intéresse aux pentes de la courbe, et que peu aux valeurs.

3.2. Impacteur manuel

Au niveau de l'impacteur manuel, nous ne présenterons que nos résultats du premier essai. En effet, lors du deuxième, nos filtres ont bougés, ce qui doit sûrement fausser un peu les valeurs trouver. Notre premier essai présentant des résultats plutôt bons, nous ne considérerons que celui-là (Figure 36).



Figure 36 : Particules recueillies sur le plateau de collection PM_{2,5}

Nous avons créé un tableau (figure 37) dans lequel nous avons relevé toutes nos différentes masses des différents éléments, avant essai et après essai. Nous pouvions ainsi déterminer la prise de masse de chaque élément, et donc la masse de particules en présence. Dans le cas où la différence des masses était négative, nous l'avons mise à zéro. Cela peut venir de plusieurs phénomènes :

- Soit la masse de départ n'a pas été déterminé totalement sèche
- Soit des impuretés étaient présentes sur la première pesée
- Soit une erreur de retranscription a eu lieu.

Nous avons donc préféré mettre de côté ces valeurs en les égalisant à zéro. Nos résultats n'en paraissent pas moins dévalorisés.

Lot n°1	Masse (avant)	Masse (après)	Différence	Valeur absolue
Filtre PM>10	0,0405 g	0,0405 g	0 g	0 g
filtre 2,5<PM<10	0,0397 g	0,0411 g	0,0014 g	0,0014 g
Filtre 1<PM<2,5	0,0405 g	0,0424 g	0,0019 g	0,0019 g
Filtre PM1	0,1419 g	0,1761 g	0,0342 g	0,0342 g
Plateau PM>10	110,6321 g	110,6332 g	0,0011 g	0,0011 g
Intermédiaire	125,3401 g	125,3406 g	0,0005 g	0,0005 g
Plateau 2,5<PM<10	110,1819 g	110,1836 g	0,0017 g	0,0017 g
Intermediaire	124,1185 g	124,1186 g	0,0001 g	0,0001 g
Plateau 1<PM<2,5	162,83 g	162,8319 g	0,0019 g	0,0019 g
Micro filtre	2,548 g	2,5478 g	-0,0002 g	0 g
Rondelle	51,4519 g	51,4507 g	-0,0012 g	0 g

Figure 37 : Tableau des pesées des filtres de l'impacteur manuel

A partir de ce tableau, nous avons pu déterminer les différentes masses par type de particules. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (figure 38) :

	Avec plateau	Sans plateau
Particule Total	0,0428 g	0,0375 g
PM10	0,0417 g	0,0375 g
PM2,5	0,0381 g	0,0361 g
PM1	0,0342 g	0,0342 g

Figure 38 : Tableau des masses relatives à chaque classe de particules

A la vue de ce tableau, il nous ait apparu que la part en masse des particules fines paraissait beaucoup plus grande que les grosses. Après avoir soustrait à chaque classe de particules la masse de la classe plus fine, nous obtenons la figure 39 suivante :

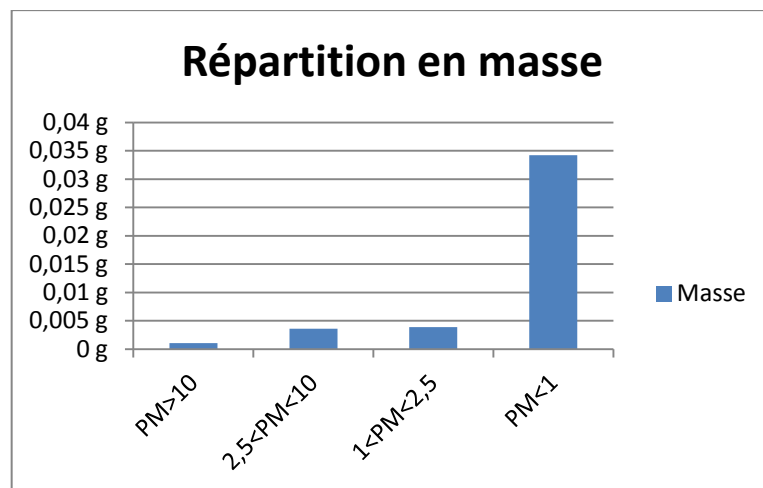


Figure 39 : Répartition de la masse selon la taille des particules

Il nous a alors fallu déterminer le volume des fumées en Nm³. Pour ce faire, nous partons de l'équation de combustion du bois (en renseignant la part d'O₂ mesurée). Nous pouvons alors déterminer nos facteurs d'émissions. La figure 40 reprend nos résultats.

	Facteur non corrigé		Tx O ₂ (moyen)	Facteur correctif	Facteur corrigé	
	Avec plateau	Sans plateau			Avec plateau	Sans plateau
Particule Total	75 mg/Nm ³	66 mg/Nm ³	12,2 %	0,91	68 mg/Nm ³	60 mg/Nm ³
PM10	73 mg/Nm ³	66 mg/Nm ³			67 mg/Nm ³	60 mg/Nm ³
PM2,5	67 mg/Nm ³	63 mg/Nm ³			61 mg/Nm ³	58 mg/Nm ³
PM1	60 mg/Nm ³	60 mg/Nm ³			55 mg/Nm ³	55 mg/Nm ³
Temps de manipulation			1 h			
Température moyenne des fumées			363,5 °C			
Volume			0,569 Nm ³			

Figure 40 : Détermination des facteurs d'émissions selon les classes de particules

On retrouve des résultats ici plutôt cohérents vis-à-vis des autres facteurs d'émissions déterminés en laboratoire sur ce type d'appareil.

3.3. ELPI

Pour l'ELPI, nous ne présenterons aussi qu'un seul résultat. En effet, la première expérience n'a pas été concluante à cause d'une pièce de l'appareil que nous avons oubliée de nettoyer.

Nous pouvons récupérer de l'ELPI via un fichier Excel différentes courbes. La première que nous analyserons est la répartition par taille des particules (figure 41).

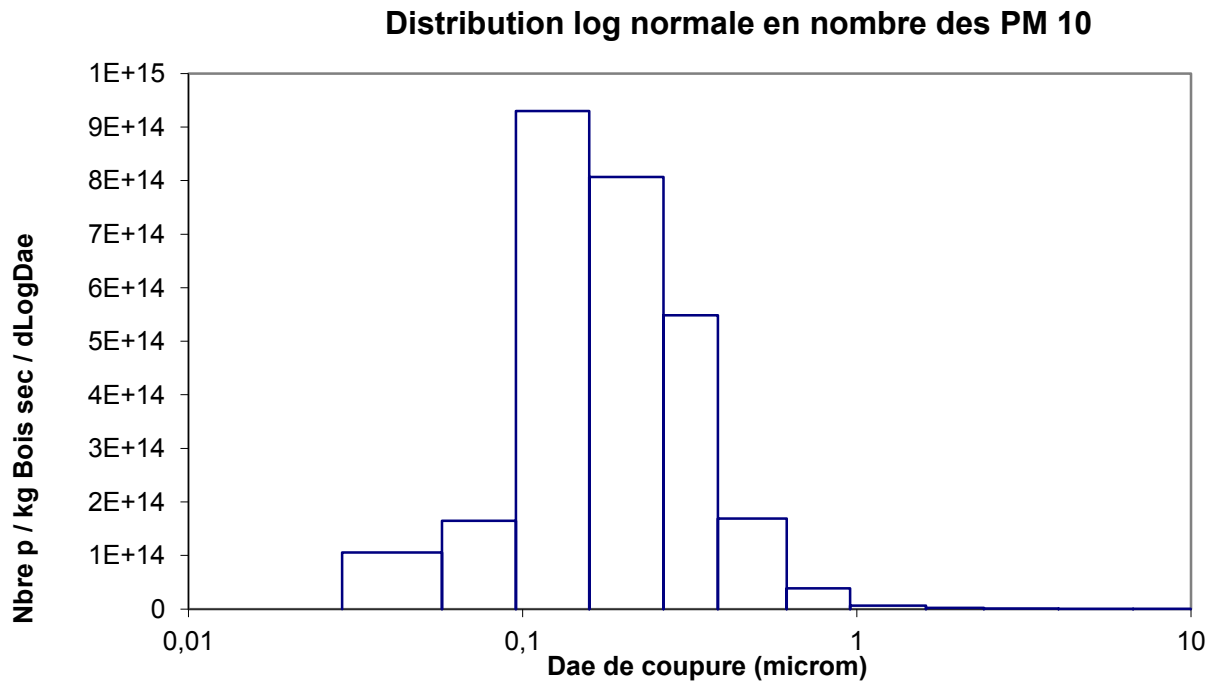


Figure 41 : Présence des particules selon la taille

Pour que cette figure soit plus parlante, nous l'avons recréée en changeant simplement le type de graphique. La figure 42 présente ce nouveau graphique.

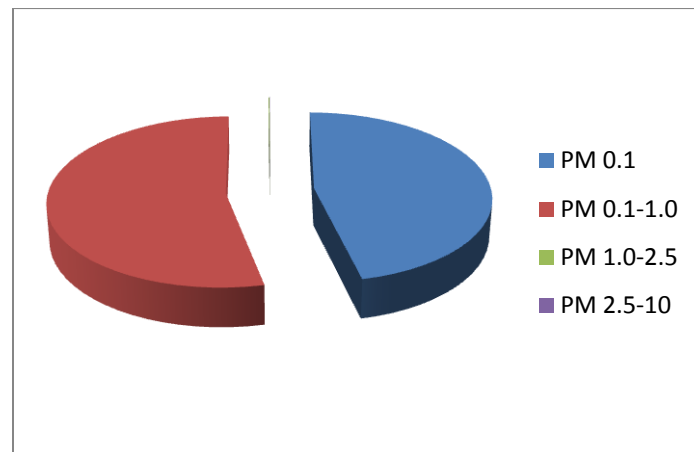


Figure 42 : Répartition en nombre des particules

Nous remarquons ici que la majorité des particules sont de taille inférieure à 1µm. Nous pouvons faire un parallèle avec la figure que nous avons créée à l'aide des données de l'impacteur manuel. Le bois serait donc plutôt émetteur de particules fines.

Nous pouvons ensuite utiliser la figure 43 pour voir à nouveau les différentes phases de combustion. En revanche, il faut bien voir cette figure avec un œil critique. Effectivement l'ELPI effectue des mesures en nombre, non pas en masse. Pour déterminer une masse, le logiciel intégré à l'ELPI utilise une densité similaire pour toutes les particules. Or, nous savons que leurs compositions changent selon la taille, et donc leur densité. Mais, cela ne nous empêche pas de nous servir de cette figure pour déterminer les trois phases de combustion.

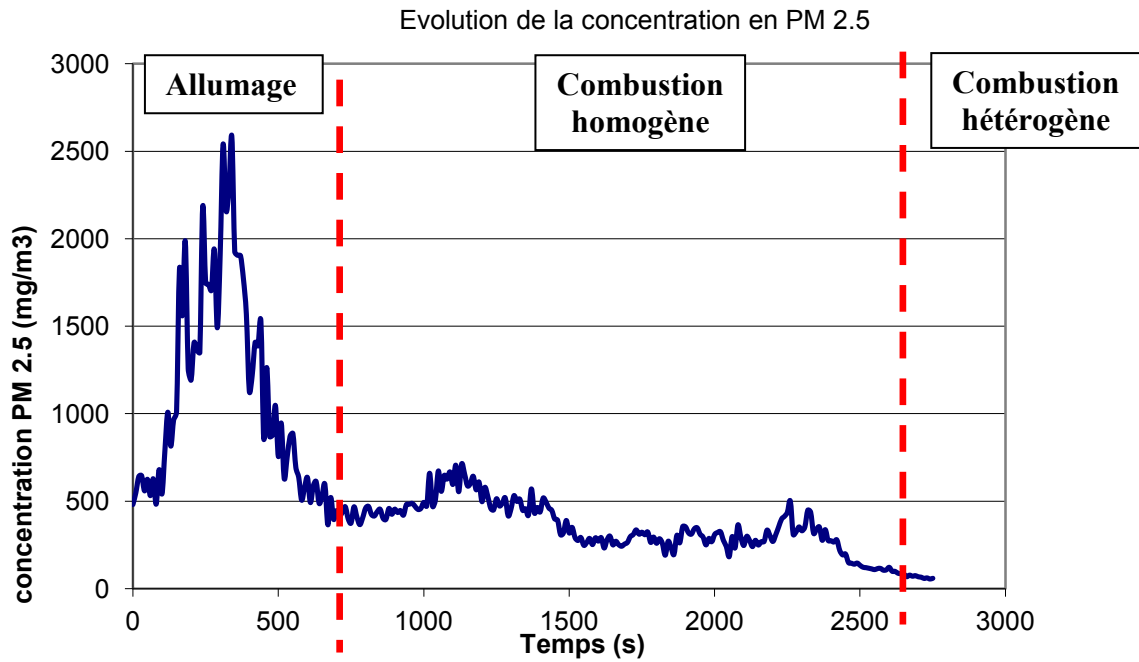


Figure 43 : Evolution de la concentration en PM 2.5 en fonction du temps

Il nous est possible d'effectuer la même analyse sur la figure 44 qui représente l'évolution en nombre des PM10.

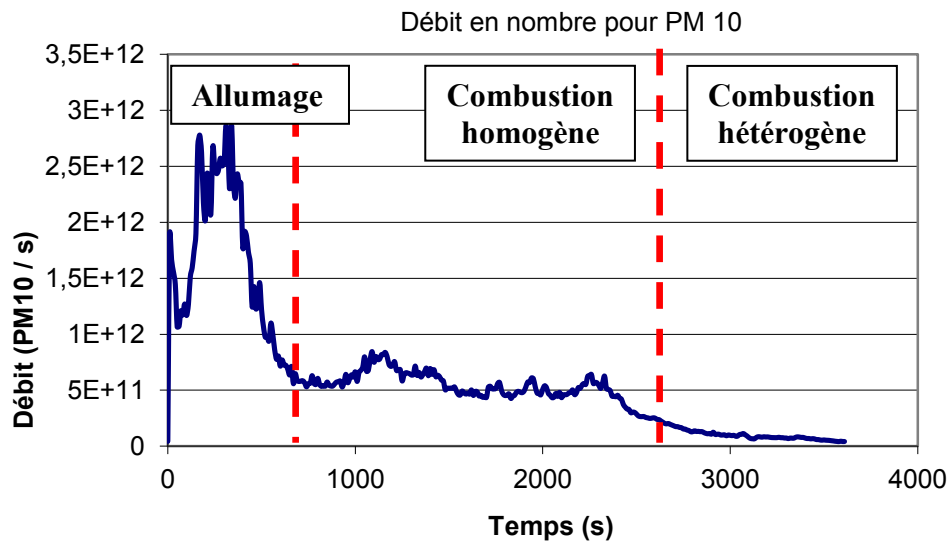


Figure 44 : Evolution du débit en nombre en fonction du temps

- PARTIE 9 - CONCLUSION EXPERIENCE

Par l'intermédiaire de la réalisation de ces essais, aussi peu nombreux puissent-ils être, nous nous sommes bien rendus compte du temps à monopoliser pour arriver à des résultats exploitables, ainsi que des nombreux paramètres à prendre en compte et agissant sur la qualité de la mesure.

Il est vrai qu'aussi peu d'essais ne peuvent être réellement représentatifs de quoi que ce soit, les conclusions se tirant suite à une bonne reproductibilité des résultats d'une mesure à l'autre. Cela dit, il s'avère que ce que nous avons obtenu semble coïncider avec l'attente que l'on pouvait en avoir et ce qui a pu se vérifier par le passé. Pour ce qui est du TESTO et de l'ELPI, les courbes obtenues traitant de l'évolution de certains composants gazeux des fumées délimitent clairement les différentes étapes d'une combustion du bois. Par ailleurs, toujours s'agissant de l'ELPI mais aussi de l'impacteur manuel, la distribution des tailles de particules collectées témoigne de la présence d'une grande majorité ayant un diamètre inférieur ou égal à 1 μm . Cela est parfaitement en accord avec le fait que le bois puisse éventuellement être l'un des principaux émetteurs de particules fines.

Ces essais nous ont permis de donner un sens pratique à ce projet de fin d'étude essentiellement bibliographique en nous permettant de découvrir deux des méthodes mentionnées dans la partie 4. Cela a permis d'illustrer les difficultés de mesures en termes de temps, de précisions et de préparation.

- PARTIE 10 - RESUME / SUMMARY

Mots clés:

Particules, Santé, Chauffage, Bois, Combustion, Mesures

Résumé :

La France fait partie des pays dont la contribution à la pollution de l'air est plus que conséquente. Pour cause, elle est actuellement mise en demeure par l'Union Européenne suite à une valeur limite dépassée et qu'elle se doit donc de diminuer radicalement. Plusieurs secteurs sont des sources potentielles et vérifiées d'émissions de particules, comme les transports, l'industrie ou l'agriculture. Mais c'est le chauffage domestique au bois qui est particulièrement visé et accusé d'émettre l'essentiel des particules fines dans l'atmosphère, ces dernières étant réputées comme dangereuses pour la santé. Un véritable débat est donc en cours pour savoir si cette énergie renouvelable qu'est le bois, maintes fois présentée comme la solution du futur et la véritable alternative aux nombreux enjeux écologiques actuels, est réellement source de pollution ou non. Débat d'autant plus compliqué qu'aucun pays n'utilise les mêmes méthodes de mesures des émissions de particules. Discerner le faux du vrai parmi les nombreuses études ayant été faites sur le sujet ainsi que toutes les données chiffrées existantes relève alors de l'impossible. Au travers de ce projet de fin d'étude, nous nous sommes donc attelés à faire un état des lieux de ce que nous savions concernant les particules issues du chauffage domestique au bois, que ce soit en termes de composition chimique, d'impact sur la santé ou encore de méthodes de mesures. Ce projet a été mené en s'appuyant à la fois sur des rapports officiels écrits durant ces dernières années et alimentant le débat, mais aussi sur des mesures effectuées au sein de l'ENSTIB.

Key words:

Particles, Health, Wood, Combustion, Measures

Abstract:

France is one of the countries air pollution of which is high. Indeed, having exceeded a threshold, the European Union wants a drastic decrease. Many sectors like transport, industry or agriculture constitute some potential and verified particle emissions sources. But the residential wood combustion is particularly charged with emitting the majority of fine particles in the atmosphere, this being rather dangerous for health. As a consequence, there is a real debate to know if wood, presented many times as the future solution and the alternative to the numerous current environmental issues, is really a pollution source or not. This is very difficult because each country uses a different method to measure particles emissions. Thus, succeed in distinguishing the fake from the truth within the numerous studies done about this subject, and the existing calculated data, is impossible. Trough this project of studies end, we have gathered what we currently knew about the chemical composition, the health impact or the measurement methods of particles coming from residential wood combustion. This project relies at the same time on official reports on this debate, but also on measures done within the School of Wood Science and Timber Engineering.

- PARTIE 11 - BIBLIOGRAPHIE

Rapport Particul'Air, *Etude Inter-Régional de la Pollution Particulaire en Zone Rurale*, Août 2011

Rapport AirParif, *La Qualité de l'Air en Île-de-France en 2011*, Mars 2012

University of Kuopio, *Biomass Combustion In Residential Heating: Particulate Measurements, Sampling And Physicochemical And Toxicological Characterization*, Janvier 2008

Rapport AirParif, *Origine des Particules en Île-De-France*, Septembre 2011

Nussbaumer Thomas, *Overview on Technologies For Biomass Combustion And Emission Levels of Particulate Matter*, Juin 2010

CITEPA, *Inventaires des Emissions de Polluants Atmosphériques et de Gaz à Effet de Serre en France Séries Sectorielles et Analyses Etendues*, Avril 2011

Les Techniques de l'Ingénieur, ROGAUME Yann , *Production de chaleur à partir du bois - Combustible et appareillage* Référence BE8747 | Date de publication : 10 Avril 2005

AUTRET Erwan, ROGAUME Yann , *Production de chaleur à partir de bois - Émissions atmosphériques. Notions de base* Référence BE8750 | Date de publication : 10 Avril 2011

World Health Organization, *Health Effects of Black Carbon*, 2012

Affnor, *Poêles à Combustibles Solides Exigences et Méthodes d'Essai*, NF EN13240, Septembre 2002

Affnor, *Foyers Ouverts et Inserts à Combustibles Solides Exigences et Méthodes d'Essai*, NF EN13229, Juin 2002

Affnor , *Biomass Gasification – Tar and particles in product gases – Sampling and analysis. DD CEN TS 15439 : 2006*, Mars 2007, 44 p.

Affnor , *Enclosed Wood Heaters - Smoke emission - Part 2: Determination of Particulate Emission. NS 3058-2*, Juin 1994, 11 p

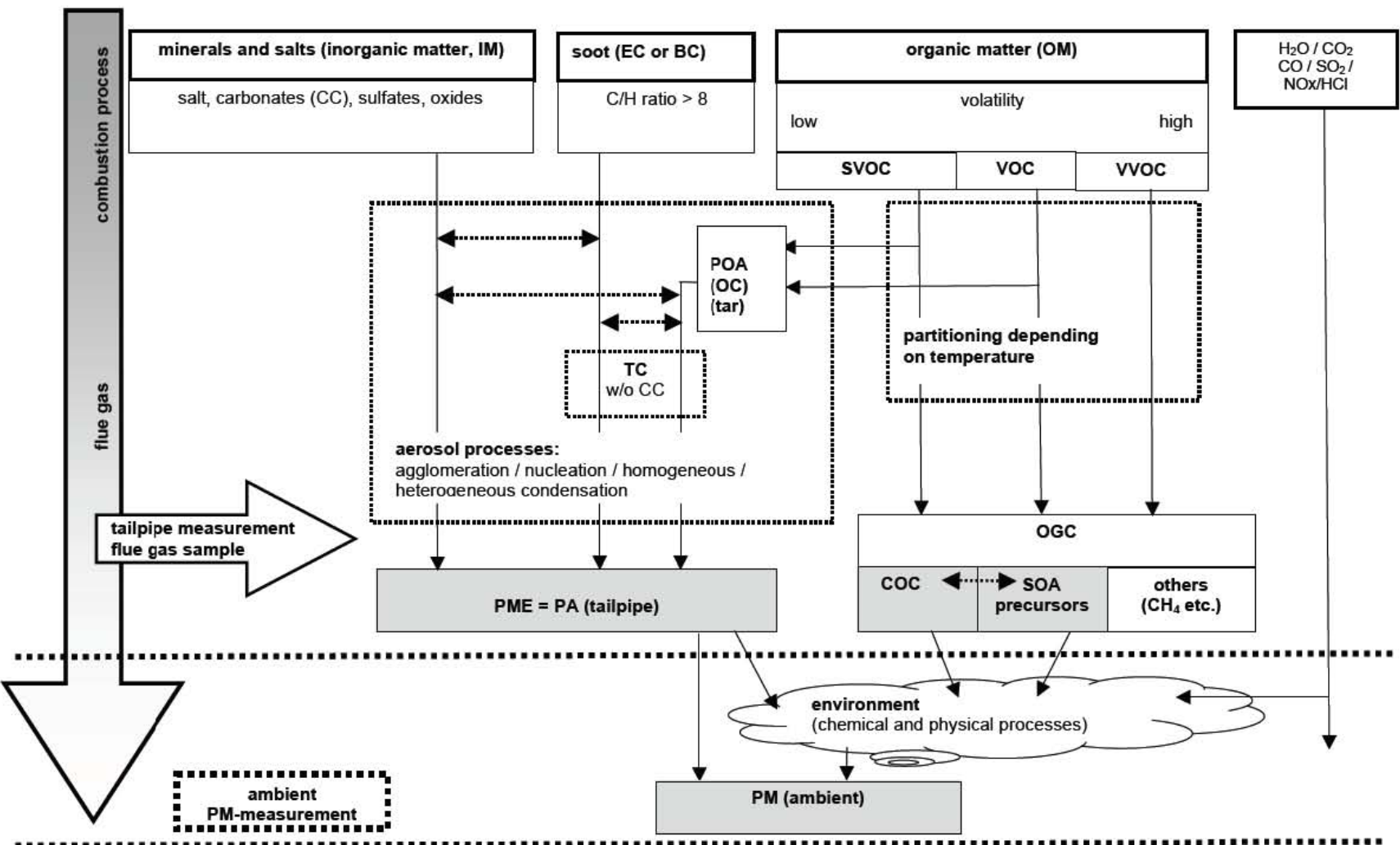
Affnor, *Détermination de la Faible Concentration en Masse de Poussières – Partie 1 : Méthode Gravimétrique Manuelle*. NF EN 13284-1, Mai 2002, 48 p.

ADEME - PEREN2BOIS : *Evaluation Technico-économique des Performances Energétiques et Environnementales des Meilleures Techniques Disponibles de Réduction des Emissions de Poussières Fines et de Composés Organiques Pour les Appareils de Combustion Domestique Utilisant la Biomasse*. 23 Avril 2012, 122 p.

PIOT, Christine. *Polluants Atmosphériques Organiques en Rhône-Alpes : Caractérisation Chimique et Sources d'Emissions*. Thèse. Chimie. Ecole doctorale SISEO, 28 Septembre 2011, 294 p.

- PARTIE 12 - ANNEXES

1. Schéma de Christian Gaegauf



2. signification des abréviations du schéma de Gaegauf

acronym	term	remarks
BC	black carbon	soot fraction of particulate matter emissions (identical EC)
CC	carbonates	carbonates formed from ash components and carbon in fuel
COC	condensable organic compounds	organic compounds in gas phase, measured in flue gas, condensing in the ambient air
EC	elemental carbon	soot fraction of particulate matter emissions (identical BC)
IM	inorganic matter	minerals and salts (carbonates, sulfates, oxides, etc.) as inorganic fraction of particulate matter emissions
NMOGC	non-methane organic gaseous carbon	potential SOA precursors and COC
OC	organic carbon	organic carbon fraction of particulate matter emissions resulting from incomplete combustion
OGC	organic gaseous carbon	stated as carbon only
OM	organic matter	SVOC, VOC and VVOC
PA	primary aerosols	salt, minerals, soot, SVOC/VOC (tar) released with the flue gas as solid or condensed particulate matter to the atmosphere (identical PME)
PM	particulate matter in ambient air	
PME	particulate matter emissions	PME = PA, solid and condensed particulate matter in the flue gas (identical PA)
POA	primary organic aerosols	organic fraction of PME
SOA	secondary organic aerosols	OGC transformed in the atmosphere to particulate matter as a result of UV exposure
soot	elemental carbon	soot (C/H > 8), carbon particles fraction of particulate matter emissions resulting from incomplete combustion (stated as carbon only)
SVOC	semi volatile organic compounds	boiling range: > 250°C
tar	tar	condensed SVOC and VOC
tailpipe measurement	tailpipe measurement	capturing point at the end of the sampling duct for measurement of PME, COC and potential SOA
TC	total carbon	carbonaceous particle fraction of particulate matter emissions TC = EC + OC (without carbonates, CC)
VOC	volatile organic compounds	boiling range: 20°C – 250°C
VVOC	very volatile organic compounds	boiling range: < 20°C