REPUBLIQUE FRANCAISE

VALABRE

CENTRE D'ESSAIS ET DE RECHERCHE

EVALUATION DE L'EFFICACITE DE FILTRATION DE LA CAGOULE FEUX DE FORETS VIS-A-VIS DES FUMEES ET DES PARTICULES FINES

RAPPORT D'ESSAIS

2017-2018

Pour la Caisse Nationale de Retraites des Agents des Collectivités Locales

CNRACL

ENTENTE - VALABRE

ETABLISSEMENT PUBLIC

Centre Francis Arrighi - domaine de Valabre - RD7 - 13120 GARDANNE

Tel. + 33 (0)4 42 60 86 50 contact-ceren@valabre.com www.valabre-ceren.org

Détail de la prestation réalisée par le CEREN	Période d'étude
Réalisation des essais, Analyses et interprétation des résultats, Rédaction	Août – Octobre 2017

Auteur : Mme ARVIEU Pascale

Le présent rapport comporte 95 pages.

Visa du Directeur du CEREN

Colonel Claude PICARD

Visa de la Directrice Adjointe du CEREN

Mme Frédérique GIROUD

Date : 30 Avril 2018

Table des matières

AVANT-PROPOS : LIMITE DE LA PORTEE CONTRACTUELLE DES TESTS 6

PREMIERE PARTIE ESSAIS EN LABORATOIRE AOUT – OCTOBRE 2017 7

1- CONTEXTE DE L'ETUDE 8

2- MATERIELS 13

2-1 PRESENTATION DES MATERIELS EMPLOYES 13
2-1-1 Cagoule de protection thermique 13
2-1-2 Dispositif expérimental de test 14
2-1-2-1 La chambre de combustion 14
2-1-2-2 La chambre à fumée E1 et le vase d'expansion E2 15
2-1-2-3 Le système d'aspiration 16
2-1-3 Matériels de mesures 17
2-1-3-1 Dosage des gaz toxiques par colorimétrie 17
2-1-3-2 Dosage des particules fines dans les fumées 18
2-1-3-3 Analyse des fumées par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse 19

3- METHODOLOGIE 22

3-1 DEROULEMENT DU TEST 22
3-1-1 Première étape : l'enfumage 22
3-1-2 Deuxième étape : réalisation des prélèvements 22
3-1-3 Troisième étape : mesures des particules fines 24
3-2 MODALITES TESTEES 25
3-3 INTERPRETATION DES RESULTATS 26

4- RESULTATS 26

4-1 DOSAGES DES COMPOSES TOXIQUES 26
4-1-1 Dosage de l'acroléine 26
4-1-2 Dosage du monoxyde de carbone CO 27
4-1-2 Dosage du formaldéhyde 28
4-2 DOSAGES DES PARTICULES FINES 29
4-2-2 Particules fines mesurées sans cagoule 29
4-2-3 Particules fines mesurées avec la cagoule 30
4-2-4 Particules fines mesurées avec la cagoule humide 31
4-3 ANALYSE DE LA COMPOSITION DES FUMEES 34
4-3-1 Composition de la fumée dans l'enceinte E1 34
4-3-2 Composition de la fumée dans l'enceinte E2 en présence de la cagoule 38
4-3-3 Analyse quantitative 42
4-3-3-1 Etude comparative des aires 42

4-3-3-2 Estimation des concentrations en BTEX dans les fumées 44

5- ESSAIS COMPLEMENTAIRES 47

5-1 PRESENTATION DES DEMI-MASQUES ANTI-POUSSIERES 47

5-1-1 Classification 47

5-1-2 Mode de fonctionnement 48

5-1-3 Identification et marquage 49

5-2 RESULTATS DES ESSAIS REALISES 50

5-2-1 Dosage des particules fines 50

5-2-1-1 Demi-masque de type FFP1 50

5-2-1-2 Demi-masque de type FFP2 51

5-2-1-3 Demi-masque de type FFP3 52

5-2-2 Analyse de la composition des fumées 55

5-2-2-1 Demi-masque de type FFP1 56

5-2-2-2 Demi-masque de type FFP2 56

5-2-2-3 Demi-masque de type FFP3 57

6- CONCLUSIONS PREMIERE PARTIE 59

DEUXIEME PARTIE ESSAIS SUR BRULAGE DIRIGE, MARS - AVRIL 2017 60

1- PRESENTATION DES ESSAIS SUR BRÛLAGE DIRIGE 61

1-1 OBJECTIFS 61

1-2 LOCALISATION 61

1-2-1 Cartographie 61

1-2-2 Végétation et conditions météorologiques 62

1-3 DEROULEMENT 63

2- INSTRUMENTATION MISE EN OEUVRE 64

2-1 MESURE DES PARTICULES FINES 64

2-2 ANALYSES GC-MS DE LA COMPOSITION DES FUMEES 65

2-3 DOSAGE PASSIF DU CO ET DU FORMALDEHYDE 66

3- RESULTATS 67

3-1 EXPOSITION AUX PARTICULES FINES 67

3-1-1 Répartition des prélèvements 67

3-1-2 Traitement des résultats 69

3-1-3 Résultats en présence d'une « fumée faible » 71

3-1-4 Résultats en présence d'une « fumée modérée » 73

3-2 EXPOSITION AUX COMPOSES CHIMIQUES CONTENUS DANS LES FUMEES 75

3-2-1 Analyse des composés chimiques contenus dans la « fumée faible » 76

3-2-1-1 Composition de la « fumée faible » en absence de cagoule 76

3-2-1-2 Composition de la « fumée faible » avec cagoule 77

3-2-1-3 Composition de la « fumée faible » avec dispositif filtrant les particules fines 78

3-2-2 Analyse des composés chimiques contenus dans la « fumée modérée » 81

3-2-2-1 Composition de la « fumée modérée » en absence de cagoule 81
3-2-2-2 Composition de la « fumée modérée » avec cagoule 83
3-2-2-3 Composition de la « fumée modérée » avec dispositif filtrant 84
3-2-3 Analyse des composés chimiques contenus dans la « fumée dense » 86
3-2-3-1 Composition de la « fumée dense » en absence de cagoule 86
3-2-3-2 Composition de la « fumée dense » en présence de cagoule 88
3-2-3-3 Composition de la « fumée dense » en présence du dispositif filtrant 89
2-3 EXPOSITION AU CO ET AU FORMALDEHYDE 93
4- CONCLUSION DEUXIEME PARTIE 95

AVANT-PROPOS : LIMITE DE LA PORTEE CONTRACTUELLE DES TESTS

Toute prestation d'essais, expérimentations, tests de contrôle ou optimisation en laboratoire sont suivies d'un compte-rendu.

Ce document qui ne saurait constituer ni une homologation, ni un agrément, ni une qualification de quelque nature que ce soit, concerne exclusivement les produits, matériels ou installations qui ont été présentés à l'examen du CEREN.

Seuls des organismes ou des commissions habilitées à délivrer de tels documents peuvent être en mesure d'apprécier la validité de ces tests et de les inclure dans de telles procédures d'homologation, d'agrément, de qualification ou de certification.

Le compte-rendu ne peut être reproduit ou publié que dans sa forme intégrale. Le CEREN décline toute responsabilité en cas de reproduction ou de publication non conforme.

Le CEREN se réserve le droit d'utiliser les enseignements qui résultent du compte-rendu pour les inclure dans des travaux de synthèse ou d'intérêt général, les travaux envisagés pouvant être publiés par ses soins.

PREMIERE PARTIE Essais en laboratoire Août – Octobre 2017

1- CONTEXTE DE L'ETUDE

La Caisse Nationale de Retraites des Agents des Collectivités Locales (CNRACL) a confié au CEREN la mission d'étudier l'efficacité de filtration de la cagoule feux de forêts, vis-à-vis des particules fines et des composés chimiques issus des fumées d'incendie de végétation.

Dans le cadre de leurs missions sur feux de forêts ou sur brûlages dirigés, les sapeurs-pompiers et les forestiers-sapeurs sont particulièrement exposés aux panaches de fumées. Leurs niveaux d'exposition sont peu connus et varient grandement en termes de durées, de concentrations et de fréquences.

Fig.1 : Exemples de situations d'exposition des personnels aux fumées d'incendie de végétation

Leurs équipements de protection individuelle EPI sont conçus pour offrir une protection thermique satisfaisante face à la majorité des risques thermiques rencontrés, mais quand est-il des risques d'intoxication par les fumées ? Quelle protection la cagoule peut-elle offrir vis-à-vis des composés potentiellement inhalables ?

Les fumées d'incendie de forêts sont constituées de nombreux composés gazeux dans lesquels des aérosols de particules solides et liquides se trouvent en suspension. Ces éléments peuvent avoir des effets sur la santé humaine selon leurs tailles, leurs compositions chimiques et leurs concentrations. Les retours d'expériences de personnes exposées à des fumées d'intensité faible à moyenne font état de troubles respiratoires et neurologiques pouvant évoluer en déperdition de la fonction respiratoire.

Les substances les plus préoccupantes actuellement identifiées sont le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, l'acroléine, le benzène, le dioxyde de carbone (CO_2), l'hydrogène sulfuré (H_2S), ainsi que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), l'ammoniac et le 2-furaldéhyde.

Le monoxyde de carbone CO :

Bien connu, le monoxyde de carbone est un gaz inodore et difficile à déceler, responsable de nombreuses intoxications. Il se forme lors d'une combustion incomplète de produits riches en carbone. Son absorption par les poumons et son passage par la barrière alvéo-pulmonaire l'entraîne rapidement dans le sang où il se fixe durablement sur l'hémoglobine en prenant la place de l'oxygène, pour former la carboxyhémoglobine.

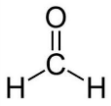
La gravité de l'intoxication est liée à sa concentration dans l'air, à la durée d'exposition et au volume respiré. Lorsque la concentration en carboxyhémoglobine atteint 5% dans le sang, des effets sont visibles sur le système nerveux, le flux sanguin de la fréquence cardiaque et pulmonaire. Lors d'une intoxication chronique, parfois confondue avec une indigestion, les premiers symptômes sont des maux de tête, une vision floue, des malaises légers et des palpitations.

A un taux supérieur à 15%, l'intoxication se traduit par des nausées, des vomissements, des vertiges avec incapacité à se déplacer, voire un évanouissement ou un coma. La mort survient pour des taux voisins de 66%.

Les pompiers subissent des intoxications au CO à la fois chroniques et aigües dans le cadre de leurs missions sur feux de forêts. Seul le dosage sanguin de la carboxyhémoglobine permet d'évaluer leur exposition réelle car les troubles provoqués ne sont pas spécifiques et peuvent être confondus avec d'autres causes. Le port d'un détecteur de CO, de 0 à 1000 ppm, réglé sur des seuils d'alerte (niveau 1 : 35ppm et niveau 2 : 100ppm en concentration) est actuellement recommandé sur le terrain pour prévenir les personnels du danger.

Le formaldéhyde CH_2O :

Autre composé préoccupant, le formaldéhyde ou méthanal est un composé de la famille des aldéhydes. Omniprésent dans l'environnement naturel ou humain, il est également retrouvé dans les fumées de combustion sous forme de gaz incolore à odeur âcre, piquante et suffocante. Il se détecte à un seuil voisin de 1 ppm et provoque une irritation massive des voies aériennes.



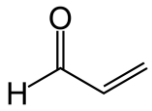
Pour des concentrations de 4 à 5 ppm, l'irritation s'aggrave et atteint la trachée et les bronches. Cette situation est difficilement supportée.

A partir de 10 ppm, des difficultés respiratoires apparaissent et à 50 ppm, des lésions graves surviennent avec œdème pulmonaire pouvant entraîner la mort. Lors d'expositions chroniques, des cas de cancers nasopharyngés ont été observés ainsi que des leucémies. C'est pourquoi le formaldéhyde est classé depuis 2004 dans le groupe 1 comme agent cancérogène pour l'homme.

Des symptômes de type fatigue, maux de tête, troubles du sommeil, vertiges, perte d'équilibre et de dextérité apparaissent pour des taux supérieurs à 0.3 ppm. **La valeur limite de moyenne d'exposition (VME) est fixée en 1993 à 0.5 ppm et la valeur limite d'exposition à court terme (VLTC) est de 1 ppm.**

L'acroléine C_3H_4O :

L'acroléine est un gaz lacrymogène également émis lors de la combustion des matières organiques. C'est une molécule fortement irritante pour les yeux et le système respiratoire. **Sa toxicité aigüe est très élevée avec une VLTC de 0.1 ppm (1982).** Lors d'une exposition chronique, on observe également une réduction du poids corporel, des altérations des voies respiratoires supérieures et des poumons avec inflammation, hémorragies et œdème. Aucun effet cancérogène n'est actuellement connu à son sujet.



Les fumées renferment également d'autres composés toxiques comme le benzène, le gaz carbonique, les oxydes d'azote, l'hydrogène sulfuré, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), l'ammoniac et le 2-furaldéhyde qui sont source d'inquiétude à des niveaux de concentrations à priori plus faibles. C'est le cas par exemple du benzène qui en exposition chronique de quelques ppm pendant plusieurs dizaines d'années entraîne des cancers du sang du type leucémie myéloïde.

Les particules fines :

Les particules en suspension dans l'air issues des fumées d'incendie de forêts sont également sources de préoccupations, en particulier celles potentiellement inhalées par les personnels. Outre les cendres volantes et les suies dont le diamètre est supérieur à 10 microns qui restent piégées dans le nez, la gorge et les yeux, les particules fines (PM pour *Particulate Matter* en anglais) ou particules respirables pénètrent profondément dans le système respiratoire.

Elles sont classées en trois catégories différentes selon leur diamètre aérodynamique :

- Les particules grossières notées PM_{10} ont un diamètre moyen compris entre 2.5 et 10 microns. Elles sont issues de processus mécaniques et leur composition est en général proche de celle du matériau d'origine. Elles retombent lentement, avec une vitesse moyenne de 3 mm/s en air calme. Cependant, le vent peut facilement les remettre en suspension. Sans mouvement d'air, leur temps de séjour dans l'air est d'environ 1 jour.

- Les particules fines $PM_{2.5}$ ont un diamètre compris entre 1 et 2.5 micron. Elles se forment à la suite de chocs entre particules plus petites et/ou par condensation de gaz sur les particules.

- Enfin, les particules très fines PM_1 ont un diamètre moyen inférieur à 1 micron. Leur durée de vie est assez brève car elles coagulent entre elles ou avec des particules plus grosses. Ces particules émises essentiellement lors de phénomènes de combustion (suies, métaux, …), sont retrouvées abondamment dans les fumées de végétation. Elles restent en suspension dans l'air car leur faible masse leur donne une vitesse de chute négligeable. Seules les précipitations peuvent les éliminer vers le sol.

L'inhalation de ces particules fines entraîne des effets sur la santé dont la gravité dépend à la fois de leur composition chimique, de leur concentration et de leur taille. Les cendres et les suies de diamètre supérieur à 10 µm, sont éliminées par la toux, les éternuements ou en avalant grâce au système digestif. En revanche, les PM_{10} rentrent dans les poumons par les bronches, tandis que les $PM_{2.5}$ pénètrent jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Seules les PM_1 sont capables de passer la barrière alvéo-capillaire pour atteindre directement le sang.

Ces trois dernières tailles de particules sont potentiellement plus toxiques car elles pénètrent profondément dans le système respiratoire et sont susceptibles de libérer dans la circulation sanguine d'autres polluants adsorbés à leur surface. Responsables d'une réponse inflammatoire au niveau des poumons, les particules fines peuvent de surcroit jouer un rôle d'adjuvant les allergies et ainsi aggraver les maladies respiratoires telles que la bronchite chronique. Enfin, elles sont associées aux processus de cancérogénèse en augmentant le risque de cancer du poumon.

Les impacts à court terme des particules fines inférieures à 2.5 µm sont clairement établis, avec des hospitalisations plus importantes pour des maladies respiratoires, des crises d'asthme.

Un excès de mortalité est constaté en particulier pour des maladies cardiorespiratoires. L'exposition prolongée à ces particules montre également une diminution de l'espérance de vie avec augmentation des maladies chroniques respiratoires, des maladies cardiovasculaires et des cancers.

Travaux réalisés :

Deux campagnes de prélèvements réalisées par le CEREN en 2013 et 2015, ont permis de suivre quelques personnels lors de brûlages dirigés afin d'estimer leurs niveaux d'exposition vis-à-vis des composés chimiques gazeux et des particules fines respirées.

Les composés les plus abondants retrouvés sur le terrain sont des dérivés benzéniques BTEX (pour le Benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes) provenant des végétaux mais aussi des hydrocarbures utilisés pour l'allumage des feux. En inhalation, ils sont classés pour la plupart comme irritants et cancérogènes. L'éthylbenzène entraîne de surcroit des effets narcotiques, tandis que les xylènes sont responsables de céphalées et de nausées.

Les fumées renferment également de nombreux terpènes comme l'alpha-pinène, le camphène et le limonène ainsi que d'autres irritants comme les hydrocarbures aromatiques, les aldéhydes et les alcènes.

Concernant les particules fines, l'importante variété des situations rencontrées sur les brûlages dirigés a permis de définir arbitrairement trois niveaux d'expositions dans les cas d'intoxication chronique et aigüe. Une exposition forte où la concentration moyenne en particules est supérieure à 30 mg/m^3. Dans cette situation, la visibilité est très faible et l'atmosphère est quasi irrespirable. Les yeux et le nez piquent tandis que la gorge est serrée.

INTOXICATION CHRONIQUE		
Fumées denses **Forte exposition**	**Fumées modérées** **Exposition modérée**	**Fumées faibles** **Faible exposition**
[PM $_{moyen}$] > 30 mg/m^3	**10 < [PM $_{moyen}$] < 30 mg/m^3**	**[PM $_{moyen}$] < 10 mg/m^3**
Très faible visibilité Atmosphère irrespirable Yeux et nez qui coulent, gorge serrée	**Visibilité voilée Gêne respiratoire, yeux et gorge irrités**	**Bonne visibilité Pas de symptôme Odeur de fumée**
INTOXICATION AIGUE		
[PM $_{pic}$] > 100 mg/m^3	**25 < [PM $_{pic}$] < 100 mg/m^3**	**[PM $_{pic}$] < 25 mg/m^3**

Tableau 1 : Niveaux d'exposition et concentrations en particules fines associés aux différents types d'intoxication

Une exposition modérée qui s'établit avec une concentration moyenne comprise entre 10 et 30 mg/m^3 et qui correspond à une visibilité ambiante voilée. La gêne respiratoire est encore présente mais moindre tandis que les yeux et la gorge sont irrités. Enfin, lorsque l'exposition est faible, la concentration moyenne n'excède pas 10 mg/m^3. La visibilité ambiante est bonne, l'odeur de fumée est perceptible mais n'occasionne pas de symptômes particuliers.

L'étude actuelle se propose de développer un dispositif expérimental en laboratoire visant à analyser la capacité de filtration de la cagoule feu de forêts vis-à-vis des différentes composantes contenues dans les fumées de végétation.

2- MATERIELS

2-1 Présentation des matériels employés

2-1-1 Cagoule de protection thermique

La cagoule de protection thermique portée en intervention sur les incendies de forêts répond à la norme **EN 13911 de 2004 et à ses annexes A & B**. Le plus souvent de couleur rouge ou beige, elle est composée d'un complexe anti-feu d'aramide et d'imide. Une ouverture élastique au niveau des yeux permet le maintien du tissu sur le visage pour le port de lunettes de protection. La cagoule recouvre le cou et les épaules. Au niveau de la bouche, le tissu est en double épaisseur et peut présenter des bandes velcros selon les modèles.

Pour les besoins de l'expérimentation, un échantillon de textile composant la cagoule est découpé puis fixé en double épaisseur sur un support spécifique.

Fig.2 : Cagoule feu de forêts découpée pour les besoins de l'expérimentation

2-1-2 Dispositif expérimental de test

Le dispositif expérimental de test développé en laboratoire se compose de 4 parties reliées entre elles par des tuyaux souples, maintenus sous aspiration d'air. Il comprend une chambre de combustion, deux enceintes E1 (chambre à fumée) et E2 (« vase d'expansion ») ainsi qu'un système d'aspiration.

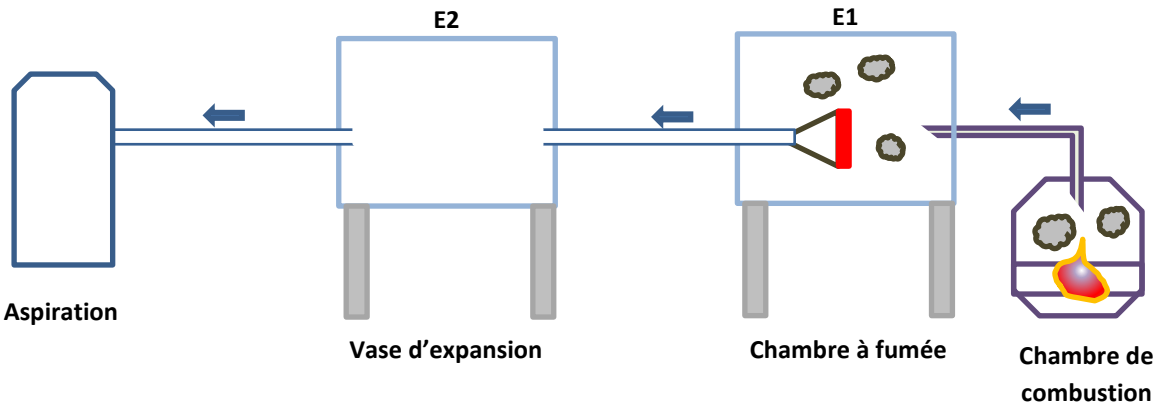


Fig.3 : Représentation schématique du dispositif expérimental de test

Le principe de fonctionnement consiste à créer puis entraîner une fumée de végétation, au travers des différents compartiments pour mettre en évidence les composés qui traversent la cagoule. Chaque élément du dispositif est décrit ci-après.

2-1-2-1 La chambre de combustion

La chambre de combustion est constituée d'un dessiccateur de laboratoire en Pyrex avec couvercle dans lequel est introduit un mélange contrôlé de matières végétales combustibles.

Fig.4 : Chambre de combustion avec raccordement

4 végétaux différents, représentatifs de la végétation méditerranéenne, sont récoltés en forêt sur le site de Valabre. Le mélange de référence est constitué d'aiguilles de pin recoupées en fragments de 1 cm, de rameaux de chêne Kermès et de Romarin pour la strate arbustive. Des herbes sèches sont également recoupées finement pour favoriser l'inflammation.

Fig.5 : Espèces végétales utilisées comme combustible de référence

La masse de chaque végétal ainsi que leur teneur en eau respective sont présentées dans le tableau ci-après.

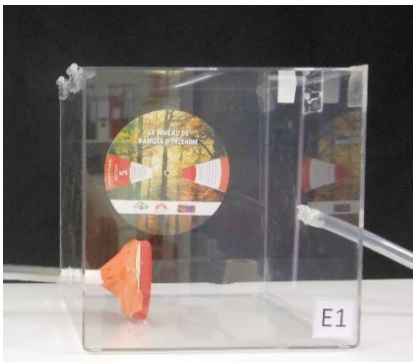
VEGETAUX UTILISES POUR LE MELANGE COMBUSTIBLE	MASSE g	TENEUR EN EAU %
Aiguilles de pin	**8**	**3.8**
Chêne Kermès	**3**	**41.6**
Romarin	**3**	**37.2**
Herbacées	**2**	**19.9**

Tableau 2 : Caractéristiques des végétaux utilisés dans la chambre de combustion

La mise à feu s'effectue en trois points à la surface du combustible au moyen d'un allume gaz.

2-1-2-2 La chambre à fumée E1 et le vase d'expansion E2

La chambre à fumée E1 est une enceinte en Plexiglass de 24.4 x 24.4 x 23.7 cm, fournissant un volume disponible de 14.1 litres. Elle comprend un couvercle en partie haute et deux orifices pour l'admission et la sortie des fumées. Elle contient également l'échantillon de textile à tester, maintenu sur un support conique, lui-même relié par tuyauterie à la deuxième enceinte E2. Cette première enceinte reçoit directement les fumées créées dans la chambre de combustion.



Le couvercle de l'enceinte est fermé hermétiquement pendant l'essai pour assurer un débit d'aspiration efficace. Après l'essai, il est réouvert pour procéder au nettoyage de l'intérieur ainsi qu'au remplacement de l'échantillon.

Fig.6 : Chambre à fumée E1

Le vase d'expansion E2 est constitué par une deuxième enceinte en Plexiglass de mêmes dimensions que E1. Deux orifices assurent l'aspiration : le premier pour le transfert des fumées d'un compartiment à l'autre à travers le textile, et le second qui permet le raccordement du dispositif au système d'aspiration. Un déflecteur placé à l'intérieur, face à l'orifice d'aspiration permet au flux d'air de se diffuser dans l'enceinte favorisant ainsi la dispersion de la fumée entrante.

Fig.7 : Vase d'expansion E2

2-1-2-3 Le système d'aspiration

L'aspiration d'air est générée par un aspirateur industriel relié au vase d'expansion E2 via une tubulure en verre maintenue sur statif qui permet une réduction de diamètre.

Fig.8 : Tubulure de raccordement du système d'aspiration

Le système d'aspiration est installé à l'extérieur du local pour ne pas polluer l'air ambiant du laboratoire, par relargage de composés chimiques et de particules fines. Il est actionné de l'intérieur grâce à un interrupteur.

La vitesse d'aspiration de l'air mesurée en entrée du dispositif au moyen d'un anémomètre portatif est de 10.7 m/s. Après réduction du diamètre à 13 mm, juste en entrée de E2, elle diminue à 2 m/s. Au niveau de l'échantillon, l'écoulement d'air qui traverse les fibres de textile se fait à une vitesse de 1 m/s, soit un débit de 11 l/min. Les vitesses d'écoulement varient d'une section à l'autre, mais le débit d'air qui correspond au volume d'air déplacé, reste constant.

A titre de comparaison, le débit d'air inhalé lors d'un effort physique modéré est de l'ordre de 15 à 30 l/min, tandis que pour des efforts intenses, il peut atteindre jusqu'à 100 l/min. Le débit appliqué ici, bien que trois fois moins important, assure cependant une aspiration efficace de la fumée dans les différents compartiments.

Pour procéder à un essai d'aspiration, les différents éléments du dispositif sont raccordés puis l'étanchéité de l'ensemble est contrôlée.

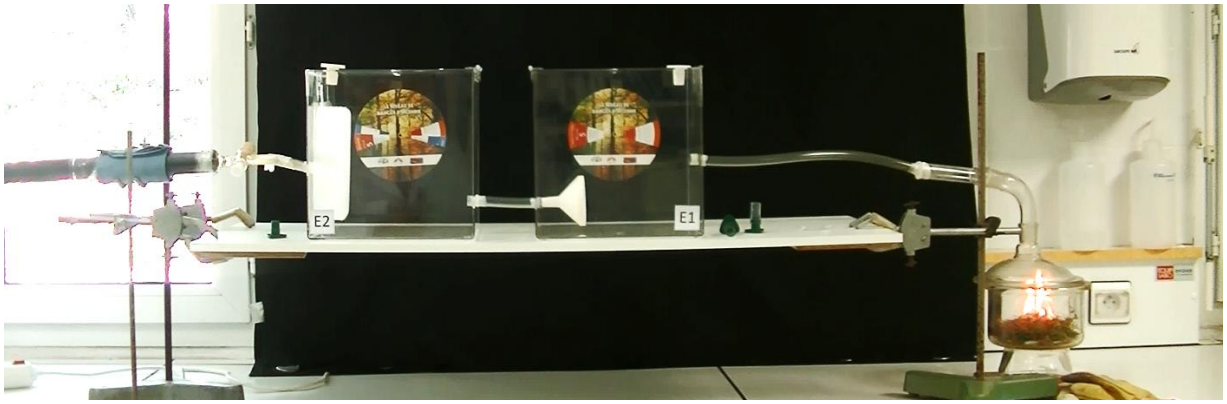


Fig.9 : Vue générale du dispositif de test

2-1-3 Matériels de mesures

Les matériels de mesure employés dans ces essais ont pour but de caractériser la fumée produite par les végétaux dans l'enceinte E1 et de la comparer à celle qui traverse potentiellement le textile de la cagoule, dans l'enceinte E2. Trois types d'analyses sont effectués pour doser respectivement les gaz toxiques, les particules fines et rechercher les composés organiques contenus dans les fumées.

2-1-3-1 Dosage des gaz toxiques par colorimétrie

Le dosage des gaz toxiques porte sur l'acroléine, le CO et le formaldéhyde. Il est réalisé au moyen de tubes colorimétriques « GAZDETEC » dont la phase intérieure réagit en présence de la molécule recherchée. Un volume d'air est aspiré dans le tube au moyen d'une pompe manuelle. La réaction colorimétrique spécifique est directement visible et comparée à l'échelle graduée gravée sur le tube. Le volume d'échantillonnage est adapté à la gamme de concentration attendue.

Fig.10 : Pompe de prélèvements et tubes colorimétriques GAZDETECT

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des tubes colorimétriques utilisés.

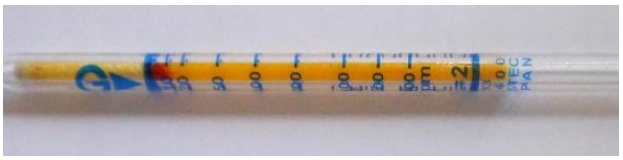
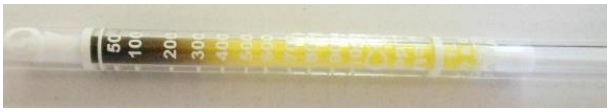
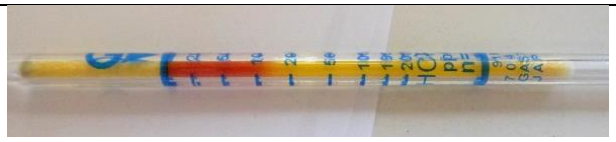
Type de composé dosé	Colorations caractéristiques	Gammes de concentrations
Acroléine	 **Passage de l'orange au rouge**	**3.3 à 10 ppm pour 4 volumes** **10 à 800 ppm pour 2 volumes**
Monoxyde de carbone CO *Gamme haute*	 **Passage du jaune au brun-noir**	**2.5 à 25 ppm pour 2 volumes** **25 à 1000 ppm pour 1 volume** **1000 à 2000 pour 1/2 volume**
Formaldéhyde *Gamme haute*	 **Passage du jaune au rouge**	**8 à 20 ppm pour 2 volumes** **20 à 2000 ppm pour 1 volume** **64 à 6400 pour 1/2 volume**

Tableau 3 : Caractéristiques techniques des tubes colorimétriques GAZDETECT utilisés

2-1-3-2 Dosage des particules fines dans les fumées

Le CEREN dispose également d'un analyseur de particules fines DUST TRACK II, de la marque TSI, qui mesure les concentrations en particules fines dans l'air, dans une gamme comprise entre 0.001 et 400 mg/m^3. L'étendue granulométrique des particules étudiées comprend 4 tailles : 1, 2.5, 4 et 10 µm.

L'appareil est un photomètre laser à diffusion de la lumière à 90°, qui mesure simultanément la fraction massique et granulométrique correspondant aux différents diamètres. L'instrument agit à la fois comme un photomètre (concentration massique) et comme un compteur optique de particules (résolution granulométrique).

Fig.11 : Compteur de particules DUST TRACK II

Pour séparer les différentes tailles de particules, l'appareil aspire l'air ambiant avec un débit de 3 litres par minutes au travers d'un dispositif appelé « kit impacteur ». Quatre impacteurs différents qui se vissent en partie supérieure sont munis d'un orifice tubulaire pour sélectionner les fractions de coupe suivantes : **PM_{10}, PM_4, $PM_{2.5}$ et PM_1.**

Fig.12 : Eléments de séparation des fractions de coupe du « Kit impacteur »

Le kit impacteur comprend également une plaque poreuse préalablement huilée qui capture les particules aspirées et évite ainsi leur rebond.

2-1-3-3 Analyse des fumées par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse

La chromatographie en phase gazeuse (GC, Gaz Chromatography) couplée à la spectrométrie de masse (MS, Mass Spectrometry) est la technique de laboratoire utilisée pour détecter les molécules organiques contenues dans les fumées avec une sensibilité élevée qui assure la fois l'exploration des composés majoritaires mais aussi des éléments présents à l'état de trace.

Le prélèvement de fumée s'effectue par aspiration d'un volume d'air de 100 ml au travers d'un tube en inox contenant un adsorbant nommé « Tenax », grâce à une pompe manuelle de prélèvement (AUBER).

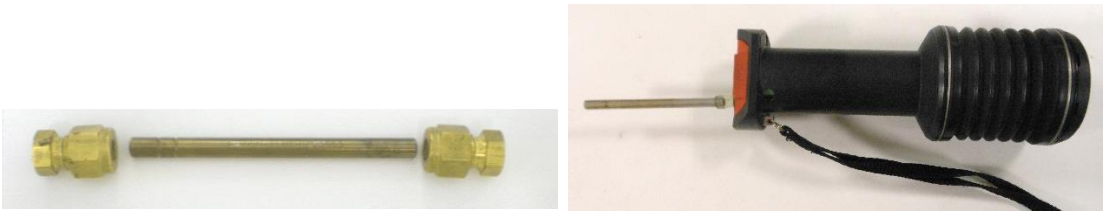


Fig.13 : Tube « Tenax » et pompe de prélèvement pour le système GC-MS

Le tube est ensuite installé dans un appareil appelé Désorbeur (TurboMatrix ATD, Perkin Elmer) qui permet de libérer les molécules par chauffage du tube puis de les reconcentrer par refroidissement sur un autre dispositif interne nommé « Trap ».

Le flux continu d'hélium entraîne ensuite ces composés dans le chromatographe en phase gazeuse GC (Autosystem XL, Perkin Elmer) qui assure leur séparation grâce à une colonne capillaire (COL Elite 5MS) adaptée à ce type de composés organiques apolaires.

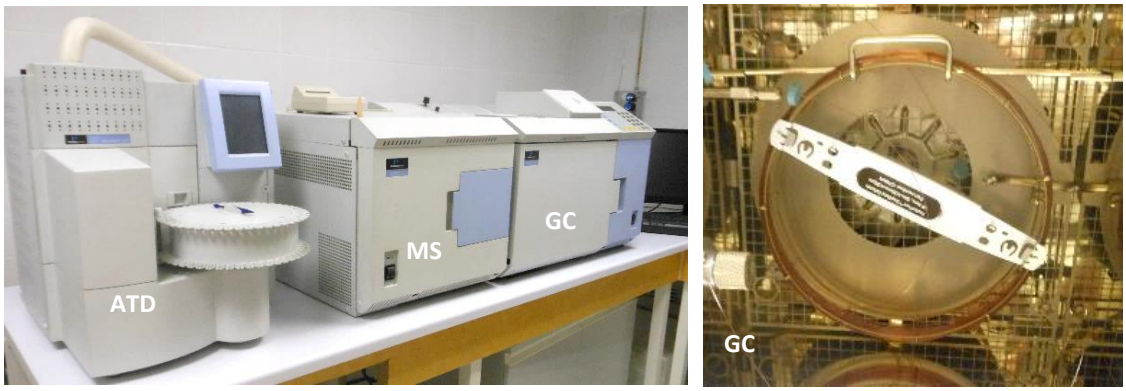


Fig.14 : Appareillages du système GC-MS et colonne capillaire du GC

La séparation dans la colonne capillaire s'effectue en fonction de la taille et de l'affinité des gaz vis-à-vis de la phase solide. Le résultat se présente sous la forme d'un chromatogramme comprenant une série de pics différentiés par leur temps d'élution et leur abondance relative en %.

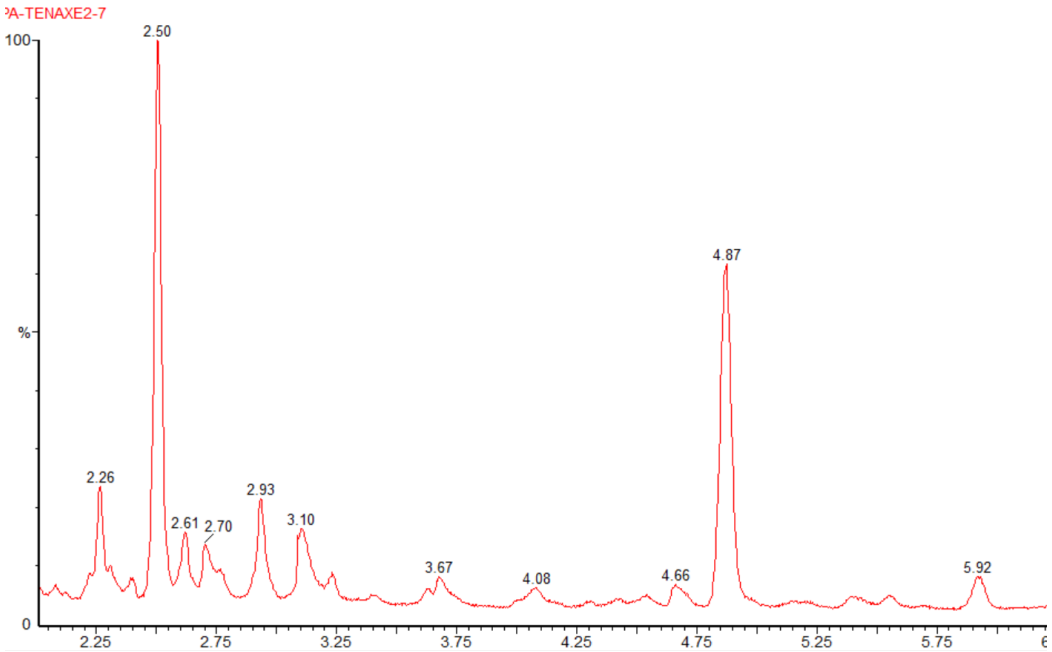


Fig. 15 : Exemple de chromatogramme en fonction du temps d'élution

Les constituants du mélange ainsi séparés arrivent finalement dans la chambre d'ionisation du spectromètre de masse MS (Turbomass Gold, Perkin Elmer) qui est maintenue sous un vide poussé. Ils sont alors bombardés par des électrons pour former des fragments d'ions caractéristiques enregistrés sous la forme d'un spectre de masse.

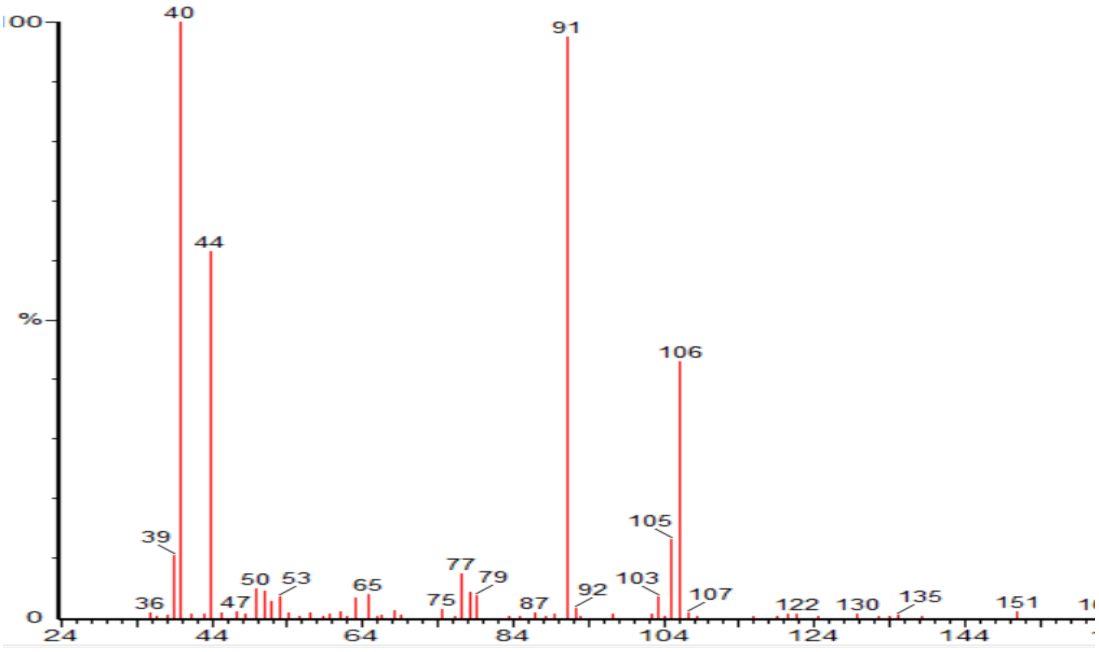


Fig. 16 : Exemple de spectre de masse

Le spectre de masse représente chaque fragment en fonction du rapport m/z en abscisse, où m représente la masse et z la valence des ions détectés. L'axe des ordonnées indique l'abondance relative de ces ions. L'identification des molécules par tous leurs fragments nécessite un traitement informatique via différentes banques de données internationales. Le résultat propose un choix de 10 molécules les plus probables qu'il convient ensuite d'analyser.

Les conditions opératoires précises sont détaillées ci-dessous :

Température de désorption ATD	**Paliers chauffage colonne**	**Masses molaires analysées Composés apolaires**
150°C	10 min à 30°C, 2°C/min entre 30°C et 100°C, 4°C/min entre 100°C et 140°C, 6°C/min entre 140°C et 200°C, 20 min à 200°C.	35 à 300

Tableau 4 : Détail des conditions opératoires du GC-MS

Le spectromètre de masse examine en continu les masses molaires comprises entre 35 à 300 unités pendant les 85 min que dure l'analyse.

3- METHODOLOGIE

3-1 Déroulement du test

3-1-1 Première étape : l'enfumage

La première étape consiste à réaliser l'enfumage du dispositif, selon la chronologie ci-dessous :

- Raccorder le dispositif au système d'aspiration, le mettre en route et contrôler son efficacité après 1 min de fonctionnement ;
- Dans la chambre de combustion, réaliser la mise à feu par trois fois à la surface du combustible au moyen de l'allume gaz. Raccorder à la chambre d'enfumage E1 au moyen de la tubulure, en laissant le couvercle de la chambre à combustion entrouvert ;
- Déclencher immédiatement le chronomètre pour mesurer le temps d'enfumage. L'opacité maximale dans E1 intervient au bout de 50 à 60 s d'aspiration.
- Lorsque le temps est atteint, arrêter l'aspiration et déconnecter la chambre de combustion ;
- Compartimenter rapidement les deux enceintes en retirant les tuyaux et en obstruant les orifices par des bouchons pour maintenir l'étanchéité dans E1 et E2 ;
- Photographier les deux enceintes pour visualiser l'opacité des fumées et procéder aux différents prélèvements.

3-1-2 Deuxième étape : réalisation des prélèvements

3-1-2-1 Prélèvements sur tubes Tenax

La recherche de la composition précise des fumées nécessite la réalisation des prélèvements sur Tenax dans les deux compartiments E1 et E2, en suivant la méthodologie ci-dessous :

- Identifier les deux tubes Tenax destinés aux prélèvements GC-MS des deux enceintes E1 et E2 respectivement ;
- Dévisser les bouchons écrous du tube E1 et le fixer sur la pompe de prélèvement (trait vers le haut). Presser le piston de la pompe pour l'armer ;
- Retirer le bouchon de l'enceinte E1 et y Introduire le tube Tenax. Le prélèvement s'effectue en pressant le bouton rouge de déverrouillage du piston d'aspiration de la pompe, soit 1 volume d'aspiration de 100 ml ;
- Refermer l'orifice de l'enceinte E1 après retrait du tube Tenax. Retirer le tube Tenax de la pompe et mettre de nouveaux bouchons en téflon pour refermer le tube ;

- Procéder ensuite de la même façon pour la deuxième enceinte E2 en prélevant **deux volume au lieu d'un**, ceci pour tenir compte de la différence de densité des fumées qui est moins importante dans E2 ;
- Installer les tubes Tenax sur le portoir du désorbeur de l'ATD en veillant à intercaler entre chaque tube de prélèvement, un tube inox vide qui sert de blanc.

3-1-2-2 Dosage des composés toxiques par tubes colorimétriques

Les analyses se poursuivent par le dosage des composés toxiques, acroléine, CO et formaldéhyde, réalisé dans les deux enceintes E1 et E2, selon les étapes ci-dessous :

- Sectionner les deux extrémités du tube de prélèvement en verre à l'aide de l'orifice coupant de la pompe de prélèvement et fixer le tube sur l'embout caoutchouc de la pompe dans le sens indiqué par le constructeur ;
- L'introduire dans l'enceinte E1 et aspirer lentement le volume requis selon la gamme de concentration choisie. Procéder par incrément de volume (selon les indications spécifiques des notices) pour ajuster le dosage et placer la lecture en milieu de graduation ;
- Laisser agir en fonction du délai réactionnel précisé pour chaque type de dosage et photographier le tube pour conserver le résultat du changement de coloration (qui s'estompe dans le temps) ;
- Noter le résultat et calculer la concentration en fonction du volume aspiré ;
- Procéder de manière identique dans l'enceinte E2, en adaptant les volumes aspirés aux concentrations attendues.

Ces prélèvements (Tenax et tubes colorimétriques) sont réalisés dans des conditions d'enfumage important, pour évaluer les niveaux de toxicité des produits dosés.

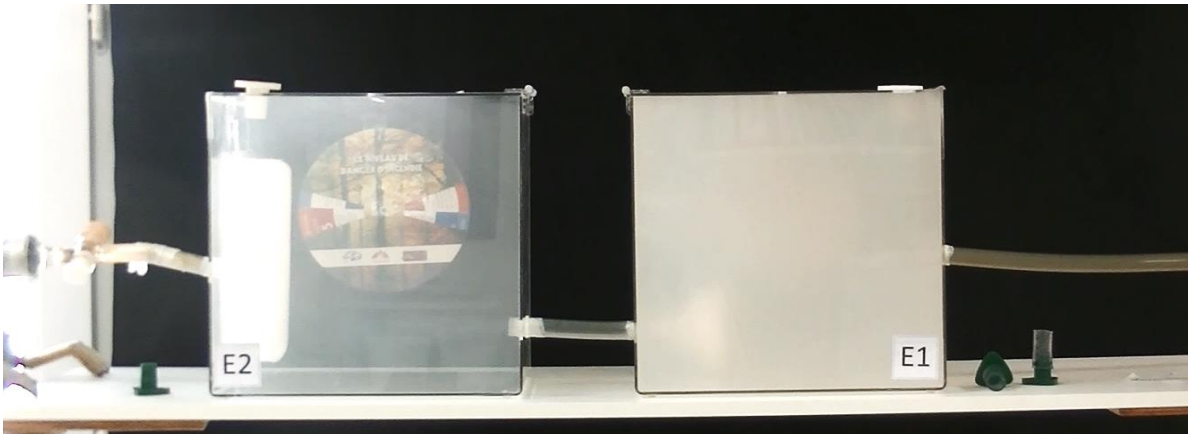


Fig. 17 : Conditions d'enfumage important pour les mesures sur Tenax et tubes colorimétriques

Cependant, avec une telle opacité, les mesures de particules fines sont supérieures à la concentration maximale de 400 mg/m^3 mesurée par l'appareil et donc impossibles à mettre en œuvre.

3-1-3 Troisième étape : mesures des particules fines

La mesure des particules fines nécessite donc la réalisation d'un essai spécifique avec un temps d'enfumage limité à 10 s. Après aspiration de la fumée et compartimentage des enceintes, il est procédé aux mesures selon les étapes décrites ci-dessous :

Préparation du matériel :

- Mettre en route le compteur de particules et procéder à une mise à zéro de l'appareil à l'aide du filtre prévu à cet effet ;
- Assembler le kit impacteur (vissage des trois pièces et huilage de la plaque) en choisissant la taille la plus grande (PM_{10}) et l'installer sur l'appareil ;

Mesures :

- Déboucher l'orifice de l'enceinte E2 et la placer sur l'impacteur de telle sorte que le point d'aspiration soit complètement à l'intérieur de l'enceinte. (La mesure commence toujours par l'enceinte la moins chargée en particules) ;
- Enregistrer les mesures pendant 10s avec une fréquence de 1 mesure/s ;
- Retirer l'enceinte, la reboucher et la mettre en attente pour les mesures suivantes ;

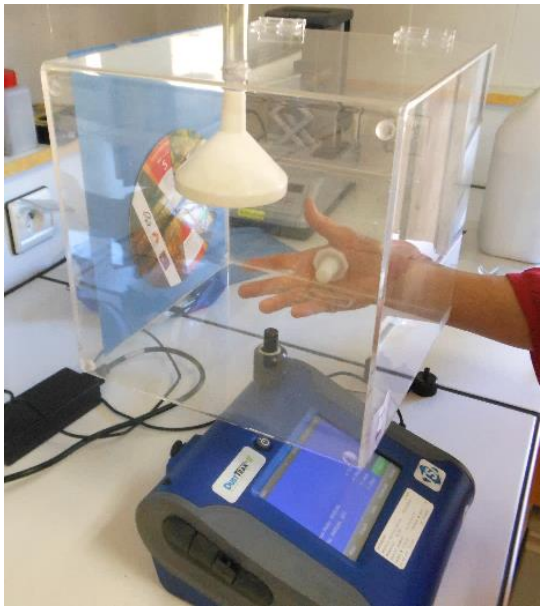


Fig. 18 : Positionnement des enceintes sur l'appareil pour la mesure des particules fines

- Procéder ensuite à une mesure de l'air ambiant pour purger l'impacteur et refaire une mesure dans l'enceinte E1, sans changer d'impacteur ;
- Noter les N° des fichiers d'enregistrement des données pour pouvoir les identifier par la suite ;

- Retirer l'impacteur de l'appareil, le dévisser et mettre le suivant de taille inférieure (PM_4) puis le replacer sur l'appareil et procéder à une mesure ambiante pour purger le système ;
- Faire successivement une mesure des PM_4 dans l'enceinte E2, une purge à l'air ambiant, puis une nouvelle mesure dans l'enceinte E1 ;
- Ces étapes sont reproduites dans les mêmes conditions pour les particules $PM_{2.5}$ et PM_1 ;
- Récupérer les fichiers d'acquisition sur PC vis un logiciel dédié à l'appareil (TSI TRAKPRO). Chaque fichier donne la série de mesures sur 10 secondes ainsi que la valeur moyenne qui est prise en compte comme résultat ;
- En dernier lieu refaire un zéro de l'appareil avant de procéder à une nouvelle série de mesures.

<u>Précautions importantes :</u>

Lors de ces essais, il faut veiller à ce que l'air ambiant du laboratoire ne se charge pas en particules fines. Pour cela, les étapes de mise à feu et de combustion sont réalisées sous la hotte d'aspiration du laboratoire. De plus, les enceintes sont purgées directement par raccordement au système d'aspiration qui évacue les fumées vers l'extérieur. Enfin, le dispositif nécessite un nettoyage régulier grâce à un chiffon imprégné de méthanol afin d'éliminer les suies et les dépôts bruns déposés sur les parois internes.

3-2 Modalités testées

Pour les besoins de l'étude, trois modalités différentes sont testées : dispositif sans cagoule, dispositif avec cagoule puis dispositif avec cagoule préalablement humidifiée. En effet, dans les conditions réelles de travail, la respiration et la transpiration contribuent à mouiller significativement le textile, d'où l'intérêt d'étudier l'influence du paramètre « humidité », sur les résultats.

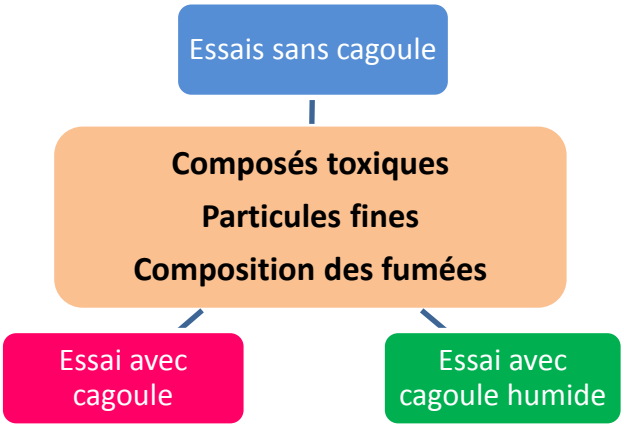


Fig. 19 : Schématisation des différentes modalités mises en œuvre

3-3 Interprétation des résultats

Bien que les essais soient conduits en contrôlant un maximum de paramètres, le volume de de fumée dégagée pendant la combustion reste un élément de variabilité. Il influe directement sur la quantité de fumée effectivement aspirée dans E1. C'est pourquoi la comparaison des résultats se fait sur la base du rapport $\frac{\text{Résultat E1}}{\text{Résultat E2}}$ obtenu pour chaque paramètre étudié.

4- RESULTATS

4-1 Dosages des composés toxiques

Les résultats des dosages de l'acroléine, du monoxyde de carbone et du formaldéhyde sont présentés ci-dessous. La concentration indiquée sur le tube est donnée en ppm (partie par million) qui correspond à des mg/kg ou des mg/l.

4-1-1 Dosage de l'acroléine

En absence de cagoule, la concentration moyenne de l'acroléine dans l'enceinte E1 est de **7 ppp, contre 2.8 ppp dans E2, soit un rapport E1/E2 égal à 2.5.** La mesure dans l'enceinte E2 est inférieure au seuil de détection.

Sans cagoule	Concentration Acroléine ppm		Rapport E1/E2
	E1	E2	
Essai 1	7	2.5	2.8
Essai 2	7	2.5	2.8
Essai 2	7	3.3	2.1
Moyenne	**7**	**2.8 ***	**2.5**

* *Peu précis, limite de détection de 3.3 ppm*

Tableau 5 : Résultats des dosages d'acroléine en absence de cagoule

Les dosages réalisés en présence de la cagoule, donnent une concentration moyenne de **3.3 ppm dans E1, contre 1.7 ppm dans E2, soit un rapport de 1.9.** Ces valeurs se situent à nouveau en limite voire en-dessous du seuil de détection.

Avec cagoule	Concentration Acroléine ppm		Rapport E1/E2
	E1	E2	
Essai 1	3.3	1.7	1.9
Essai 2	3.3	1.7	1.9
Essai 3	3.3	1.7	1.9
Moyenne	**3.3***	**1.7 ***	**1.9**

* *Peu précis, en limite de détection*

Tableau 6 : Résultats des dosages d'acroléine avec cagoule

En effet, pour des concentrations inférieures à 3.3 ppm qui est la limite basse de la détection, la sensibilité et donc la précision du dosage est plus faible.

Conclusions :

La comparaison entre les deux modalités est délicate du fait de la faible sensibilité de la mesure. Aucune autre gamme plus sensible permettant de doser des concentrations inférieures, n'est actuellement disponible auprès du fabricant. Compte tenu de ces résultats, le test n'est pas mis en œuvre pour la modalité « cagoule humide ». **Ces résultats montrent cependant que l'acroléine traverse aisément le textile de la cagoule. Compte tenu de la VLTC fixée à 0.1 ppm, ils indiquent également que ces fumées sont très toxiques avec des concentrations d'acroléine 17 à 70 fois plus élevées que la VLTC.**

4-1-2 Dosage du monoxyde de carbone CO

La gamme de mesure du CO est comprise entre 2.5 et 2000 ppm. En absence de cagoule, la concentration moyenne de CO est de 1067 ppm dans E1 et 300 ppm dans E2, soit un rapport de **3.6**. Les résultats sont équivalents d'un essai à l'autre.

Sans cagoule	Concentration CO ppm		Rapport E1/E2
	E1	E2	
Essai 1	1200	300	4.0
Essai 2	1000	300	3.3
Essai 3	1000	300	3.3
Moyenne	**1067**	**300**	**3.6**

Tableau 7 : Résultats des dosages du CO en absence de cagoule

Les essais réalisés avec la cagoule, conduisent aux résultats ci-dessous.

Avec cagoule	Concentration CO ppm		Rapport E1/E2
	E1	E2	
Essai 1	2000	300	6.7
Essai 2	1000	200	5.0
Essai 3	1000	300	3.3
Moyenne	**1333**	**267**	**5.0**

Tableau 8 : Résultats des dosages de CO avec cagoule

La présence de la cagoule ne conduit pas à une diminution des concentrations de CO dans l'enceinte E2. En effet, la concentration moyenne est de 267 ppm ce qui est équivalent au résultat obtenu en absence de cagoule. Cependant, le calcul du rapport E1/E2 donne une valeur moyenne supérieure de **5.0** du fait d'une variabilité plus importante de la concentration de CO dans le compartiment E1.

Conclusion :

Le monoxyde de carbone, tout comme l'acroléine passe aisément au travers de la cagoule de protection. Les concentrations mesurées dans E2 sont équivalentes à celles obtenues en absence de cagoule. La teneur en CO dans la fumée initiale est cependant plus variable, sans doute liée aux conditions de sa formation. En effet, le CO se crée lors d'une combustion rendue incomplète par manque d'oxygène. **De telles concentrations, 5 à 21 fois plus élevées que la VME du CO, confirme à nouveau la toxicité importante de ces fumées (VME du CO = 50 ppm ou 55mg/m^3 sur 8 heures de travail).**

4-1-2 Dosage du formaldéhyde

La détection spécifique du formaldéhyde par les tubes colorimétriques est possible dans la gamme de concentration comprise entre 8 et 6400 ppm. En absence de cagoule, la concentration en formaldéhyde mesurée dans E1 est en moyenne de **50 ppm,** contre **14 ppm** dans E2, soit un rapport de **3.6.**

Sans cagoule	Concentration Formaldéhyde ppm		Rapport E1/E2
	E1	E2	
Essai 1	40	14	2.9
Essai 2	60	14	4.3
Moyenne	**50**	**14**	**3.6**

Tableau 9 : Résultats des dosages du formaldéhyde en absence de cagoule

Avec la cagoule de protection, la concentration moyenne dans E1 est de **70 ppm** contre **22 ppm** dans E2**,** soit un rapport de **3.1.**

Avec cagoule	Concentration Formaldéhyde ppm		Rapport E1/E2
	E1	E2	
Essai 1	100	30	3.3
Essai 2	40	14	2.9
Moyenne	**70**	**22**	**3.1**

Tableau 10 : Résultats des dosages du formaldéhyde avec cagoule

Le dosage du formaldéhyde est bien centré sur la gamme de concentration correspondant à 1 volume d'aspiration. **La présence de la cagoule ne modifie pas sensiblement le rapport E1/E2.** A nouveau des variations importantes sont relevées dans l'enceinte E1. **Ces concentrations sont 28 à 140 fois plus élevées que la VME de 0.5 ppm.**

Conclusions :

Ces résultats montrent d'une part que les molécules toxiques d'acroléine, de CO et de formaldéhyde traversent aisément le textile de la cagoule de protection et que d'autre part les fumées de végétations sont très nocives. Une certaine variabilité des résultats est constatée dans les dosages de l'enceinte E1. Les gammes de mesures disponibles pour le CO et le formaldéhyde sont adaptées aux concentrations expérimentales. En revanche, le dosage de l'acroléine est peu précis car les concentrations expérimentales sont inférieures au seuil de détection des tubes colorimétriques.

4-2 Dosages des particules fines

Chaque modalité fait l'objet de 4 séries de mesures pour chaque taille de particules. Le résultat se présente sous la forme d'une concentration moyenne pour chaque taille et chaque enceinte. Pour chaque série, la somme des concentrations moyennes (somme des fractions massiques) est également calculée ainsi que leur rapport E1/E2.

4-2-2 Particules fines mesurées sans cagoule

Les tableaux ci-dessous présentent les mesures de particules fines obtenues dans E1 et E2, en absence de cagoule de protection.

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	49.5	21.0	2.4
	4	79.9	27.1	2.9
	2.5	38.5	13.2	2.9
	1	43.1	19.7	2.2
Somme des fractions massiques		**211**	**81**	**2.6**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	94.6	48.9	1.9
	4	76.4	40.8	1.9
	2.5	81.9	27.8	2.9
	1	60.0	25.5	2.4
Somme des fractions massiques		**313**	**143**	**2.2**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	89.3	38.0	2.4
	4	88.4	51.3	1.7
	2.5	93.8	45.4	2.1
	1	106	47.3	2.2
Somme des fractions massiques		**378**	**182**	**2.1**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	118	56.8	2.1
	4	73.5	58.9	1.2
	2.5	63.1	32.1	2.0
	1	80.6	22.4	3.6
Somme des fractions massiques		**335**	**170**	**2.2**

Tableau 11 : Mesures des particules fines en absence de cagoule

En absence de cagoule, le rapport moyen des fractions massiques totales E1/E2 est de **2.3** associé à un écart type de **0.2.** Le pourcentage de particules qui arrive dans E2 est en moyenne de **45.7%.**

Le calcul du pourcentage de répartition moyen par taille de particules dans E1 et E2 est représenté graphiquement ci-dessous.

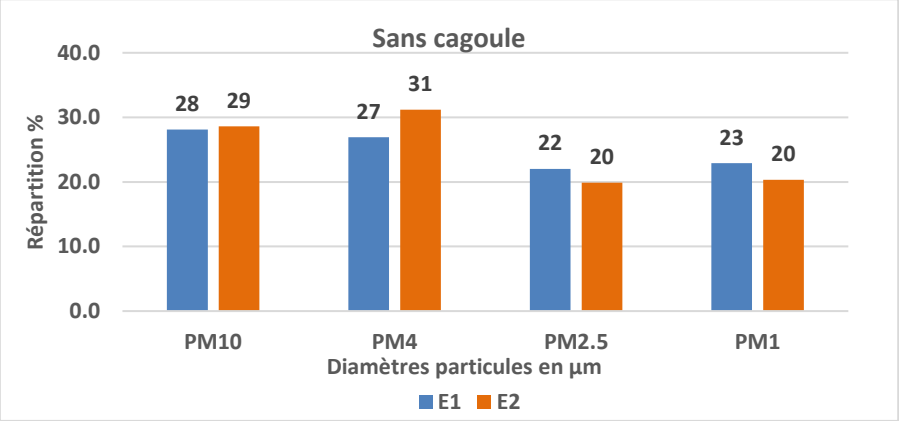


Fig. 20 : Répartition moyenne en % par taille de particules dans les deux enceintes, en absence de cagoule

Le transfert de la fumée de E1 vers E2 ne modifie pas significativement le pourcentage de répartition des différentes tailles de particules. Les variations observées qui sont au maximum de +4% pour les PM_4, sont liées essentiellement à la diffusion aléatoire des particules dans le volume de l'enceinte.

4-2-3 Particules fines mesurées avec la cagoule

Les résultats obtenus en présence de la cagoule sont présentés ci-dessous :

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	192	98.2	2.0
	4	281	65.4	4.3
	2.5	135	70.6	1.9
	1	172	67.3	2.6
Somme des fractions massiques		**780**	**302**	**2.6**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	286	101	2.8
	4	240	71.8	3.3
	2.5	206	90.6	2.3
	1	162	76.9	2.1
Somme des fractions massiques		**894**	**340**	**2.6**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	226	99.0	2.3
	4	195	85.3	2.3
	2.5	119	71.4	1.7
	1	130	55.7	2.3
Somme des fractions massiques		**670**	**311**	**2.2**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	79.4	25.4	3.1
	4	89.4	26.7	3.3
	2.5	42.1	27.8	1.5
	1	41.6	24.5	1.7
Somme des fractions massiques		**253**	**104**	**2.4**

Tableau 12 : Mesures des particules fines en présence de la cagoule

La moyenne des rapports massiques E1/E2 est de **2.4** associé à un écart type de **0.2. Ces résultats sont équivalents à ceux obtenus en absence de cagoule. Le pourcentage de particules traversées est alors de 41.1%.**

En ce qui concerne leur pourcentage de répartition au sein des deux compartiments, on observe une variabilité expérimentale plus importante pour les tailles PM_4 et $PM_{2.5}$ avec -8 et +6% respectivement.

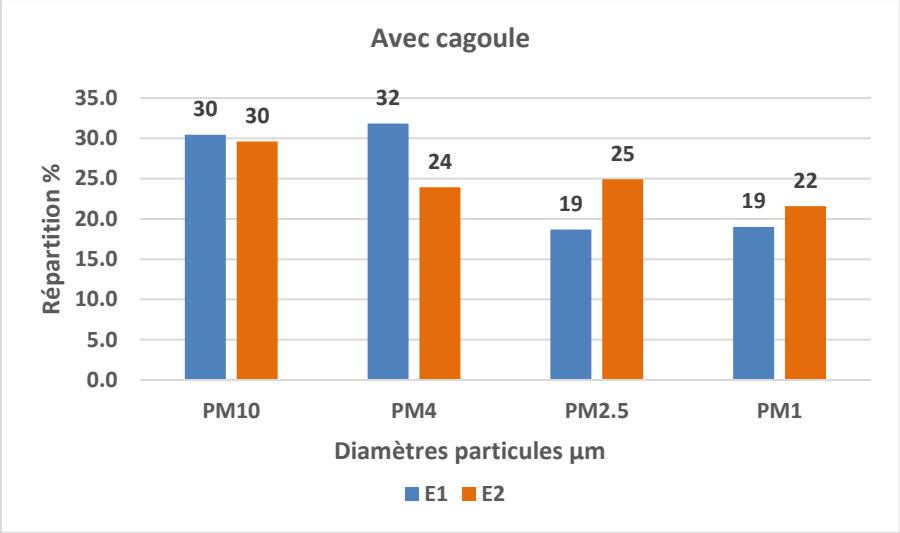


Fig. 21 : Répartition moyenne en % par taille de particules dans les deux enceintes, en présence de la cagoule

Conclusions :

La présence de la cagoule ne modifie pas le rapport des concentrations de particules mesurées dans les deux compartiments. Ces résultats démontrent que la cagoule feux de forêts laisse passer l'ensemble des particules fines contenues dans la fumée.

4-2-4 Particules fines mesurées avec la cagoule humide

La cagoule est très souvent humide voire mouillée lorsque les personnels respirent et transpirent au cours de leurs missions. Que se passe-t-il vis-à-vis des particules fines lorsque le textile est humide ? Les mesures de particules réalisées en présence d'une cagoule préalablement humidifiée sont présentées ci-après.

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	198	55.1	3.6
	4	162	35.7	4.5
	2.5	142	25.8	5.5
	1	135	42.3	3.2
Somme des fractions massiques		**637**	**159**	**4.0**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	112	29.5	3.8
	4	118	25.1	4.7
	2.5	107	25.7	4.2
	1	89	23.2	3.8
Somme des fractions massiques		**426**	**104**	**4.1**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	164	40.3	4.1
	4	156	33.3	4.7
	2.5	131	35.4	3.7
	1	126	29.6	4.3
Somme des fractions massiques		**577**	**139**	**4.2**

Tableau 13 : Mesures des particules fines en présence de la cagoule humide

Les résultats montrent que la présence d'humidité conduit à une augmentation du rapport moyen E1/E2 avec **4.1**, comparé à celui mesuré sur le textile sec. Le pourcentage de particules ayant traversées est alors de **24.5%,** soit une diminution de **16.6%** comparé au textile sec.

Le graphe ci-dessous récapitule les rapports E1/E2 obtenus pour les trois modalités.

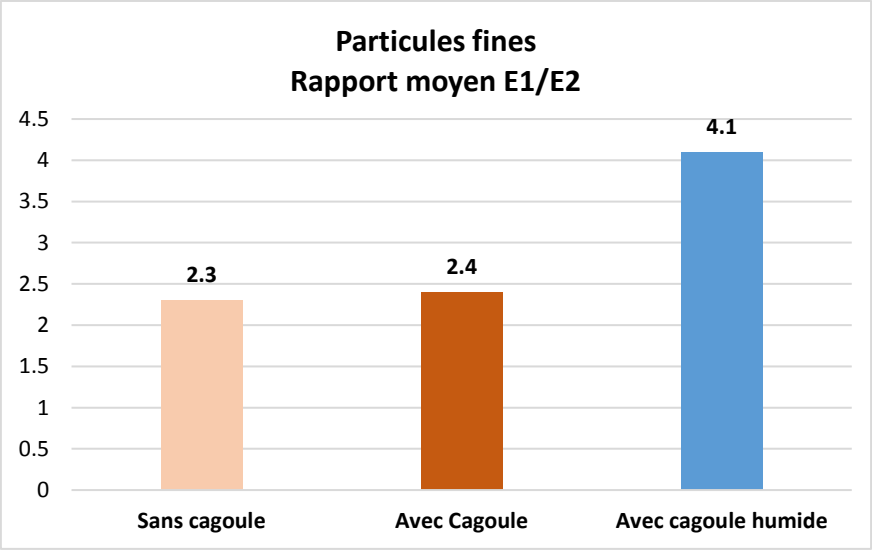


Fig. 22 : Rapports moyens E1/E2 obtenus pour les particules fines sur les trois modalités testées

Cette augmentation résulte d'une diminution des concentrations en particules fines dans l'enceinte E2. La présence d'eau dans la fibre textile gène le passage des particules fines sans pour autant le supprimer. On peut supposer que la respiration au travers de la cagoule est également plus difficile dans ces conditions.

Le pourcentage de répartition des particules est calculé puis moyenné pour chaque taille.

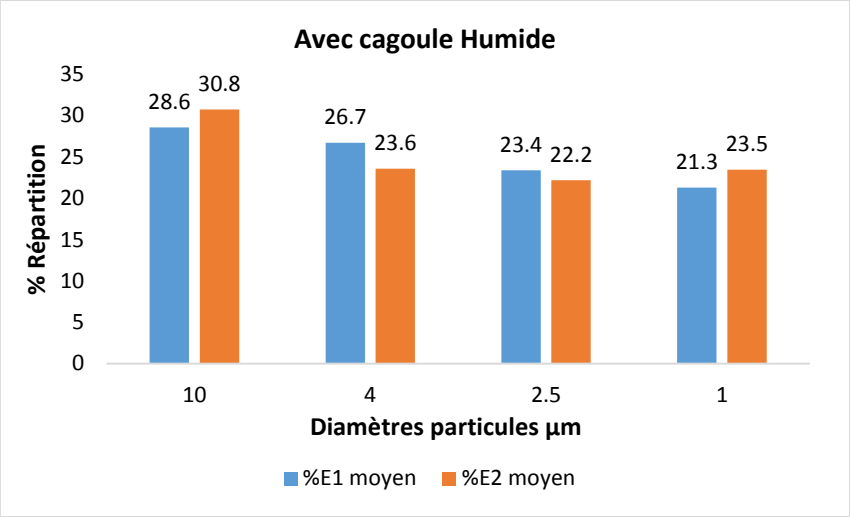


Fig. 23 : Pourcentage de répartition par taille de particules – Cagoule humide

Le pourcentage de répartition moyen des différentes tailles de particules montre peu de différence entre les deux enceintes E1 et E2. La diminution des particules dans E2 n'est pas imputable à une taille spécifique, l'interception se fait plutôt globalement.

Conclusions :

Les mesures effectuées sur les trois modalités indiquent que la cagoule feux de forêts ne permet pas de filtrer les particules fines contenues dans les fumées.

Les rapports des concentrations massiques mesurés avec ou sans cagoule sont équivalent. En revanche, il est multiplié par 2 lorsque la cagoule est préalablement humidifiée.

Le taux de particules fines transféré de E1 vers E2 est de 45.7 % en absence de cagoule. En présence de la cagoule, il est considéré comme équivalent avec 41.1%. Par contre, il diminue à 24.5% lorsque le textile de la cagoule est humidifié. L'interception physique des particules se fait sans distinction de taille.

4-3 Analyse de la composition des fumées

Les fumées générées par la combustion des quatre espèces végétales conjointes sont analysées dans les deux enceintes E1 et E2 et pour chaque modalité testée.

4-3-1 Composition de la fumée dans l'enceinte E1

L'analyse du tube Tenax dans l'enceinte E1 est réalisée en présence d'une fumée dense dans des conditions de faible visibilité et correspond à un volume de 100 ml. Le chromatogramme obtenu est présenté ci-dessous.

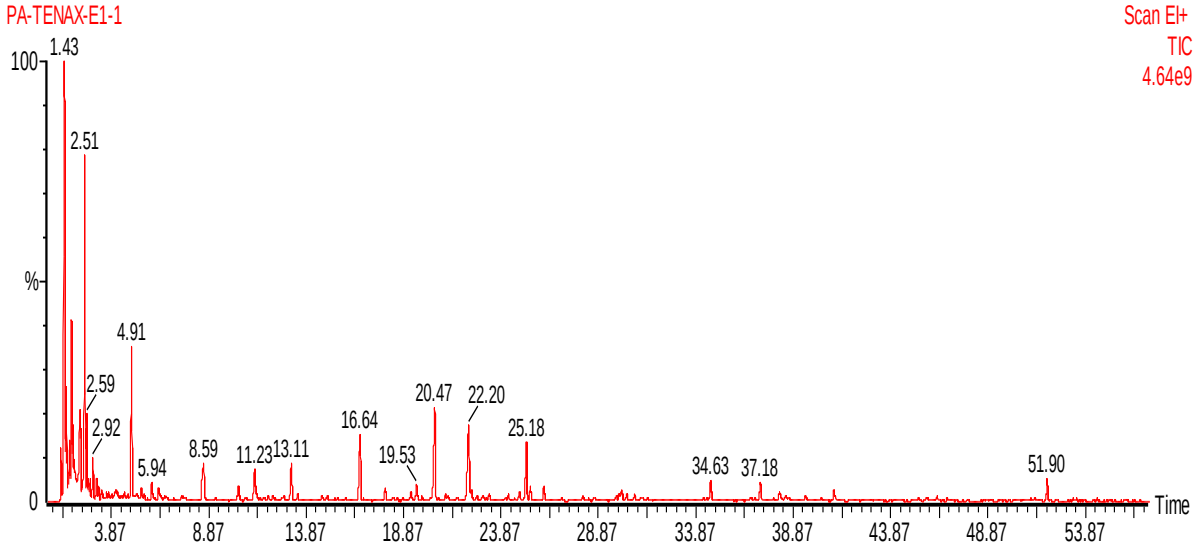


Fig. 24 : Chromatogramme obtenu dans l'enceinte E1 – 100ml

L'identification successive de chaque pic permet de dresser une liste de **98 composés** différents classés en trois groupes selon leur abondance respective.

Les composés sont dits **majoritaires** (en jaune), si l'intensité du pic est supérieure à **4 10^7.** Ils sont dits en quantité **modérée** (en rose) lorsque l'intensité du pic est comprise entre **2 10^7 et 4 10^7**. Enfin, les produits **minoritaires** (en vert) ont un pic d'intensité inférieur à **2 10^7.** Les seuils ci-après sont définis arbitrairement par rapport à l'aire relative du pic principal, calculée informatiquement.

Catégories de composés	Seuils d'intensité des pics
Composés majoritaires	**> 4 10^7**
Composés modérés	**2 10^7< x < 4 10^7**
Composés minoritaires	**< 2 10^7**

Tableau 14 : Identification des seuils définissant les catégories de composés

La liste des composés identifiés dans la fumée est rassemblée dans le tableau ci-dessous, par ordre croissant de leur temps d'élution. Chaque molécule est indiquée par son nom chimique, sa masse molaire, sa formule brute et son numéro CAS d'identification internationale.

Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.43	PENTANAL, 2,3-DIMETHYL	114	C7H14O	32749-94-3
1.47	1,3-PENTADIENE	68	C5H8	504-60-9
1.58	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.73	2-BUTENAL	70	C4H6O	4170-30-3
1.82	1-BUTANOL, 2-ETHYL-	102	C6H14O	97-95-0
1.91	FURAN, 2-METHYL	82	C5H6O	534-22-5
1.98	1,3-PENTADIENE, 3-METHYL-, (E)-	82	C6H10	2787-43-1
2.25	1,3 CYCLOHEXADIENNE	80	C6H8	592-57-4
2.51	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.59	ACETIC ACID, METHYL ESTER	74	C3H6O2	79-20-9
2.69	3-BUTEN-2-ONE, 3-METHYL-	84	C5H8O	814-78-8
2.78	1,4-PENTADIENE, 2-METHYL	82	C6H10	763-30-4
2.92	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.23	FURAN, 2,5-DIMETHYL-	96	C6H8O	625-86-5
4.15	ETHANONE, 1-CYCLOPROPYL-	84	C5H8O	765-43-5
4.32	BICYCLO[4.1.0]HEPT-2-ENE	94	C7H10	2566-57-6
4.60	2-CYCLOPENTEN-1-ONE	82	C5H6O	930-30-3
4.72	1,3,5-HEXATRIENE, 3-METHYL-, (Z)-	94	C7H10	24587-27-7
4.91	BENZENE, METHYL- TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.56	1,7-OCTADIENE	110	C8H14	3710-30-3
5.94	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.10	CYCLOPENTANONE	84	C5H8O	120-92-3
6.29	PROPANOIC ACID, 2-OXO-, METHYL ESTER	102	C4H6O3	600-22-6
6.60	HEXANAL	100	C6H12O	66-25-1
7.48	CYCLOTRISILOXANE, HEXAMETHYL-	222	C6H18O3Si3	541-05-9
7.55	CYCLOHEXENE, 1,3-DIMETHYL-	110	C8H14	2808-76-6
7.94	1,3-OCTADIENE	110	C8H14	1002-33-1
8.59	2-FURANCARBOXALDEHYDE FURFURAL	96	C5H4O2	98-01-1
9.65	1-HEPTENE, 2,6-DIMETHYL	126	C9H18	3074-78-0
10.00	1,5-DIMETHYL-1,4-CYCLOHEXADIENE	108	C8H12	17351-28-9
10.39	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4

Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
10.74	2-FURANMETHANOL	98	C5H6O2	98-00-0
11.23	BENZENE, 1,3-DIMETHYL- M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
11.71	CYCLOHEXANE, 1,4-BIS(METHYLENE)	108	C8H12	4982-20-1
11.91	PHENYLETHYNE	102	C8H6	536-74-3
12.16	2-PROPANONE, 1-(ACETYLOXY)	116	C5H8O3	592-20-1
12.43	CYCLOHEXENE, 3-BROMO	160	C6H9Br	1521-51-3
12.66	1,8-NONADIENE	124	C9H16	4900-30-5
13.44	1-NONENE	126	C9H18	124-11-8
14.01	4-HEPTENAL, (Z)-	112	C7H12O	6728-31-0
14.19	NONANE	128	C9H20	111-84-2
14.94	2,4,6-OCTATRIENE, 2,6-DIMETHYL-, (E,Z)-	136	C10H16	7216-56-0
15.18	ETHANONE, 1-(2-FURANYL)-	110	C6H6O2	1192-62-7
15.92	BENZENE, (1-METHYLETHYL)-	120	C9H12	98-82-8
16.64	ALPHA.-PINENE	136	C10H16	80-56-8
16.98	2-CYCLOHEXEN-1-ONE	96	C6H8O	930-68-7
17.92	CAMPHENE BICYCLO[2.2.1]HEPTANE, 2,2-D	136	C10H16	79-92-5
18.33	1,3-CYCLOPENTADIEN, 5,5-DIMETHYL-2-PROPY	136	C10H16	900163-57-0
18.54	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
18.80	L-LIMONENE CYCLOHEXENE, 1-METHYL-4-(1	136	C10H16	5989-54-8
18.92	1,3-CYCLOPENTADIENE, 5,5-DIMETHYL-1-PROP	136	C10H16	900163-57-1
19.25	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.53	BENZALDEHYDE	106	C7H6O	100-52-7
19.81	5-METHYL FURFURAL	110	C6H6O2	620-02-0
20.47	BICYCLO[3.1.1]HEPTANE, 6,6-DIMETHYL-2-ME	136	C10H16	18172-67-3
21.01	1,3-CYCLOHEXADIENE, 1,5,5,6-TETRAMETHYL-	136	C10H16	514-94-3
21.14	BENZENE, (1-METHYLETHENYL)- .ALPHA.-METHYLSTYRENE	118	C9H10	98-83-9
21.62	1,9-DECADIENE	138	C10H18	1647-16-1
22.20	BETA.-PINENE	136	C10H16	127-91-3
22.36	1-DECENE	140	C10H20	872-05-9
22.63	BENZENE, 1-ETHENYL-4-METHYL-	118	C9H10	622-97-9
22.93	PSEUDOLIMONENE: CYCLOHEXANE, 1-METHYLE	136	C10H16	499-97-8
23.27	DELTA.3-CARENE	136	C10H16	13466-78-9
24.09	GAMMA.-TERPINENE : 1,4-CYCLOHEXADIENE,	136	C10H16	99-85-4
24.24	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL-	120	C9H12	108-67-8
24.81	BENZENE, 1-METHYL-2-(1-METHYLETHYL)-	134	C10H14	527-84-4
25.18	D-LIMONENE	136	C10H16	5989-27-5
25.38	EUCALYPTOL	154	C10H18O	470-82-6
26.07	INDENE	116	C9H8	95-13-6
27.01	1,3,6-OCTATRIENE, 3,7-DIMETHYL-	136	C10H16	13877-91-3
28.07	PHENOL, 2-METHYL: O-CRESOL	108	C7H8O	95-48-7

Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
28.66	**BENZALDEHYDE, 4-METHYL-**	120	C8H8O	104-87-0
29.92	**PHENOL, 4-METHYL-**	108	C7H8O	106-44-5
30.06	**PHENOL, 2-METHOXY- : GUAIACOL**	124	C7H8O2	90-05-1
30.32	**BENZENE, 1-METHYL-2-(2-PROPENYL)-**	132	C10H12	1587-04-8
30.73	**1-UNDECENE**	154	C11H22	821-95-4
34.63	**CAMPHOR : BICYCLO[2.2.1]HEPTAN-2-ONE, 1**	152	C10H16O	76-22-2
36.69	**BORNEOL: 1,7,7-TRIMETHYL-BICYCLO[2.2.1**	154	C10H18O	507-70-0
36.91	**PHENOL, 4-ETHYL: P-ETHYLPHENOL**	122	C8H10O	123-07-9
37.18	**AZULENE : CYCLOPENTACYCLOHEPTENE**	128	C10H8	275-51-4
38.50	**1-DODECENE**	168	C12H24	112-41-4
40.96	**2,3-DIHYDRO-BENZOFURAN**	120	C8H8O	496-16-2
45.29	**NAPHTHALENE, 1-METHYL-**	142	C11H10	90-12-0
46.25	**NAPHTHALENE, 2-METHYL-**	142	C11H10	91-57-6
46.77	**PHENOL, 4-ETHENYL-2-METHOXY-**	150	C9H10O2	7786-61-0
47.82	**CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	87-44-5
48.65	**CIS-CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	87-44-5
50.28	**BETA.-OURBONENE:CYCLOBUTA[1,2:3,4]DICYCLOPENTENE, DECAHY**	204	C15H24	5208-59-3
50.70	**1,11-DODECADIENE**	166	C12H22	5876-87-9
51.06	**1-TETRADECENE**	196	C14H28	1120-36-1
51.26	**ISOCARYOPHYLLEN :GAMMA.-CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	118-65-0
51.41	**TETRADECANE**	198	C14H30	629-59-4
51.90	**TRANS-CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	118-65-0
53.09	**ACENAPHTHYLENE**	152	C12H8	208-96-8
53.25	**NAPHTHALENE, 1,2,3,5,6,7,8,8A-OCTAHYDRO-**	204	C15H24	30021-74-0
53.42	**ALPHA.-CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	6753-98-6
54.29	**NAPHTHALENE, 1,2,4A,5,6,8A-HEXAHYDRO-4,7**	204	C15H24	483-75-0
55.39	**PENTADECANE**	212	C15H32	629-62-9

Tableau 15 : Inventaires des composés chimiques retrouvés dans la fumée de l'enceinte E1

La fumée générée par les 4 espèces végétales choisies renferme donc **98 molécules gazeuses** différentes dont **11** sont en quantité majoritaire, **6** en concentration modérée et **81** en quantité minoritaire.

Ces 98 molécules se répartissent sur 8 familles chimiques différentes. Le tableau ci-dessous les présentent dans l'ordre décroissant de leurs effectifs :

FAMILLE DE PRODUITS CHIMIQUES	EFFECTIFS DANS LES PRELEVEMENTS
Alcènes linéaires et cycliques	33
Composés cycliques aromatiques et terpènes	21
Hydrocarbures linéaires cycliques et aromatiques	20
Alcools linéaires, ramifiés et cycliques	9
Cétones	7
Aldéhydes	5
Acides	2
Amines	1

Tableau 16 : Effectifs des composés classés par familles chimiques

La famille la plus représentée est celle des alcènes linéaires et cycliques qui compte un total de 33 molécules différentes. Avec une vingtaine de composés, viennent ensuite les deux familles des cycles aromatiques/terpènes et des hydrocarbures cycliques/aromatiques. Ces trois familles majoritaires représentent 75% des molécules identifiées dans la fumée.

Le reste de la fumée renferme 9 alcools (linéaires, ramifiés et cycliques), 7 cétones, 5 aldéhydes, 2 acides et 1 amine.

4-3-2 Composition de la fumée dans l'enceinte E2 en présence de la cagoule

L'identification optimale d'un composé nécessite une hauteur de pic supérieure à trois fois la hauteur du bruit de fond. Le passage de la fumée de E1 vers E2 provoque une dilution des gaz qui pourrait diminuer l'intensité des pics et gêner leur identification. Pour éviter cette perte éventuelle d'information, le volume de prélèvement dans E2 est multiplié par 2.

Le chromatogramme obtenu est présenté ci-après :

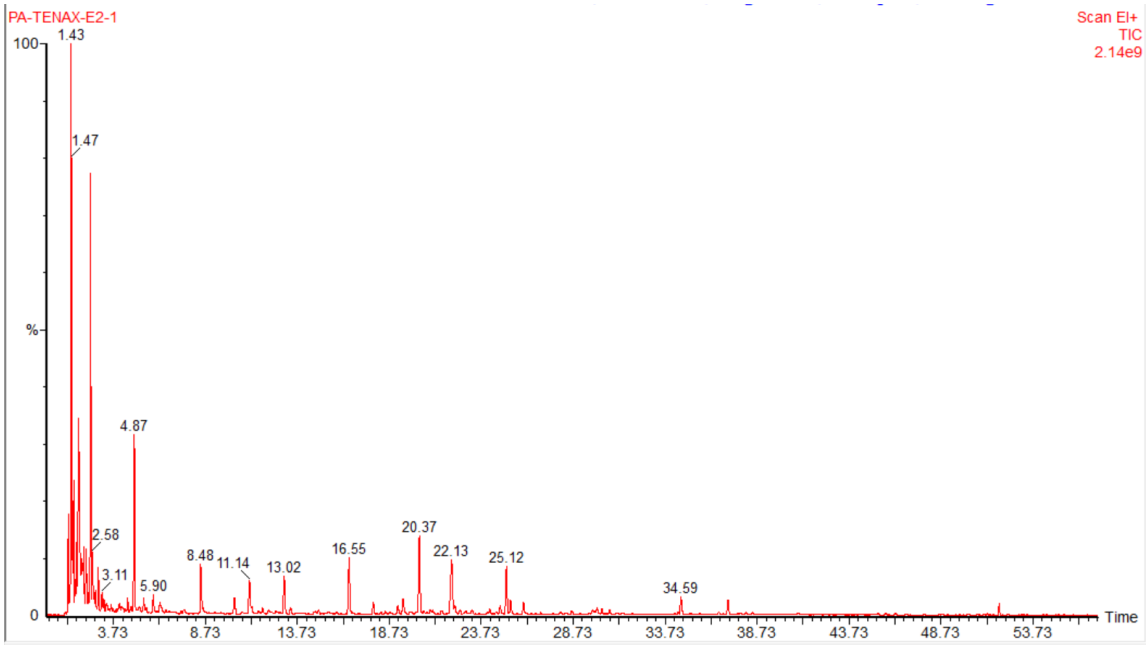


Fig. 25 : Chromatogramme obtenu dans l'enceinte E2 - 200 ml

La liste des composés identifiés dénombre **89 molécules** chimiques au lieu de 98 qui sont répertoriées ci-après.

Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.43	PENTANAL, 2,3-DIMETHYL	114	C7H14O	32749-94-3
1.47	1,3-PENTADIENE	68	C5H8	504-60-9
1.57	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.72	2-BUTENAL	70	C4H6O	4170-30-3
1.82	1-BUTANOL, 2-ETHYL-	102	C6H14O	97-95-0
1.88	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
1.98	1,3-PENTADIENE, 2-METHYL-,	82	C6H10	926-54-5
2.25	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.51	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.58	ACETIC ACID, METHYL ESTER	74	C3H6O2	79-20-9
2.91	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.22	FURAN, 2,5-DIMETHYL-	96	C6H8O	625-86-5
4.07	3-METHYLENECYCLOHEXENE	94	C7H10	1888-90-0
4.51	2-CYCLOPENTENE-1-METHANOL	98	C6H10O	13668-59-2
4.71	BICYCLO[4.1.0]HEPT-2-ENE	94	C7H10	2566-57-6
4.87	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.9	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.09	CYCLOPENTANONE	84	C5H8O	120-92-3
6.25	PROPANOIC ACID, 2-OXO-, METHYL ESTER	102	C4H6O3	600-22-6

Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
6.59	HEXANAL	100	C6H12O	66-25-1
7.41	CYCLOTRISILOXANE, HEXAMETHYL-	222	C6H18O3Si3	541-05-9
7.57	CYCLOPENTENE, 1,2,3-TRIMETHYL-	110	C8H14	473-91-6
7.89	1,3-OCTADIENE	110	C8H14	1002-33-1
8.48	2-FURANCARBOXALDEHYDE FURFURAL	96	C5H4O2	98-01-1
10.31	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4
11.14	BENZENE, 1,3-DIMETHYL M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
11.63	CYCLOHEXANE, 1,4-BIS(METHYLENE)-	108	C8H12	4982-20-1
11.84	PHENYLETHYNE	102	C8H6	536-74-3
12.15	2-PROPANONE, 1-(ACETYLOXY)-	116	C5H8O3	592-20-1
12.59	1,8-NONADIENE	124	C9H16	4900-30-5
13.02	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	622-79-7
13.37	1-NONENE	126	C9H18	124-11-8
14.01	4-HEPTENAL, (Z)-	112	C7H12O	6728-31-0
14.12	NONANE	128	C9H20	111-84-2
14.65	HEPTANAL	114	C7H14O	111-71-7
14.71	2-CYCLOPENTEN-1-ONE, 2-METHYL-	96	C6H8O	1120-73-6
14.89	2,4,6-OCTATRIENE, 2,6-DIMETHYL-, (E,Z)-	136	C10H16	7216-56-0
15.20	ETHANONE, 1-(2-FURANYL)-	110	C6H6O2	1192-62-7
15.86	BENZENE, (1-METHYLETHYL)-	120	C9H12	98-82-8
16.55	ALPHA.-PINENE	136	C10H16	80-56-8
17.86	CAMPHENE : BICYCLO[2.2.1]HEPTANE, 2,2-D	136	C10H16	79-92-5
18.28	1,3-CYCLOPENTADIENE, 5,5-DIMETHYL-2-PROP	136	C10H16	900163-57-0
18.50	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
18.76	DL-LIMONENE : CYCLOHEXENE, 1-METHYL-4-(	136	C10H16	138-86-3
18.88	1,3-CYCLOPENTADIENE, 5,5-DIMETHYL-1-PROP	136	C10H16	900163-57-1
19.20	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.48	BENZALDEHYDE	106	C7H6O	100-52-7
19.82	5 METHYL FURFURAL	110	C6H6O2	620-02-0
20.37	BICYCLO[3.1.1]HEPTANE, 6,6-DIMETHYL-2-ME	136	C10H16	18172-67-3
20.98	1,3-CYCLOHEXADIENE, 1,5,5,6-TETRAMETHYL-	136	C10H16	514-94-3
21.10	BENZENE, (1-METHYLETHENYL)	118	C9H10	98-83-9
21.57	1,9-DECADIENE	138	C10H18	1647-16-1
22.13	.BETA.-PINENE	136	C10H16	127-91-3
22.31	1-DECENE	140	C10H20	872-05-9
22.58	BENZENE, 1-ETHENYL-4-METHYL-	118	C9H10	622-97-9
22.90	PSEUDOLIMONENE: CYCLOHEXANE, 1-METHYLE	136	C10H16	499-97-8
23.23	.DELTA.3-CARENE $$ BICYCLO[4.1.0]HEPT-3-	136	C10H16	13466-78-9
24.06	.GAMMA.-TERPINENE : 1,4-CYCLOHEXADIENE,	136	C10H16	99-85-4
24.20	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL-	120	C9H12	108-67-8
24.77	BENZENE, 1-METHYL-2-(1-METHYLETHYL)-	134	C10H14	527-84-4
25.18	DL-LIMONENE: CYCLOHEXENE, 1-METHYL-4-(	136	C10H16	138-86-3

Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
25.33	**EUCALYPTOL**	154	C10H18O	470-82-6
26.03	**INDENE**	116	C9H8	95-13-6
26.98	**1,3,6-OCTATRIENE, 3,7-DIMETHYL-, (Z)-**	136	C10H16	3338-55-4
28.02	**PHENOL, 2-METHYL**	108	C7H8O	95-48-7
28.67	**BENZALDEHYDE, 4-METHYL-**	120	C8H8O	104-87-0
29.87	**PHENOL, 4-METHYL-**	108	C7H8O	106-44-5
30.30	**BENZENE, 1-METHYL-2-(2-PROPENYL)**	132	C10H12	1587-04-8
30.71	**1-UNDECENE**	154	C11H22	821-95-4
34.59	**CAMPHOR: BICYCLO[2.2.1]HEPTAN-2-ONE, 1**	152	C10H16O	76-22-2
36.65	**BORNEOL**	154	C10H18O	10385-78-1
37.15	**AZULENE: CYCLOPENTACYCLOHEPTENE**	128	C10H8	275-51-4
38.49	**1-DODECENE**	168	C12H24	112-41-4
40.96	**BENZOFURAN, 2,3-DIHYDRO**	120	C8H8O	496-16-2
44.31	**PHENOL, 4-ETHYL-2-METHOXY**	152	C9H12O2	2785-89-9
45.31	**NAPHTHALENE, 1-METHYL-**	142	C11H10	90-12-0
46.26	**NAPHTHALENE, 2-METHYl**	142	C11H10	91-57-6
46.78	**PHENOL, 4-ETHENYL-2-METHOXY-**	150	C9H10O2	7786-61-0
47.82	**CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	87-44-5
50.70	**1,11-DODECADIENE**	166	C12H22	5876-87-9
51.01	**1-TETRADECENE**	196	C14H28	1120-36-1
51.26	**ISOCARYOPHYLLEN**	204	C15H24	118-65-0
51.42	**TETRADECANE**	198	C14H30	629-59-4
51.90	**CIS-CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	87-44-5
53.10	**ACENAPHTHYLENE**	152	C12H8	208-96-8
53.25	**NAPHTHALENE, 1,2,3,4,4A,5,6,8A-OCTAHYDRO**	204	C15H24	30021-74-0
53.42	**.ALPHA.-CARYOPHYLLENE**	204	C15H24	6753-98-6
54.29	**NAPHTHALENE, 1,2,4A,5,6,8A-HEXAHYDRO-4,7**	204	C15H24	483-75-0
55.39	**PENTADECANE**	212	C15H32	629-62-9

Tableau 17 : Liste des composés identifies dans l'enceinte E2

Selon les seuils définis plus haut, **3** produits restent majoritaires au lieu de 11, **5** produits se trouvent en quantité modérée au lieu de 6 et **81** produits restent minoritaires. La proportion de composés majoritaires diminue du fait de la dilution de la fumée.

En revanche, **82 molécules** contenues dans l'enceinte E2 sont identiques à celles retrouvées dans E1, soit 84% de la composition initiale. Tous les composés majoritaires et modérés ainsi que 81% des produits minoritaires sont présents dans E2. **Ces résultats indiquent que la composition de la fumée dans l'enceinte E2 est équivalente à celle de l'enceinte E1**.

Conclusions :

Les composés chimiques contenus dans la fumée traversent le textile de la cagoule et sont retrouvés dans l'enceinte E2. Les mêmes analyses réalisées sur le textile humidifié donnent des résultats équivalents. Par conséquent, la cagoule feux de forêts n'assure aucune filtration des molécules gazeuses contenues dans les fumées de végétation.

4-3-3 Analyse quantitative

4-3-3-1 Etude comparative des aires

Suite aux analyses successives, il apparait que la composition des fumées reste stable d'un essai à l'autre. L'approche comparative repose sur le choix de 9 molécules dont la présence est systématique dans tous les prélèvements et dont la séparation est optimale pour garantir un calcul précis de l'aire du pic. Le tableau ci-après en dresse la liste.

Temps de rétention min	Composés sélectionnés et présents dans tous les essais
2.51	BENZENE
4.91	BENZENE, METHYL TOLUENE
8.59	2-FURANCARBOXALDEHYDE FURFURAL
11.23	BENZENE, 1,3-DIMETHYL M-XYLENE
13.44	1-NONENE
16.64	ALPHA-PINENE
20.47	BICYCLO[3.1.1]HEPTANE, 6,6-DIMETHYL-2-ME
22.20	BETA-PINENE
25.18	D-LIMONENE

Tableau 18 : Liste des 9 molécules retenues pour l'approche comparative

Le calcul de l'aire des pics est une fonction d'intégration fournie par le logiciel Turbomass du GC/MS.

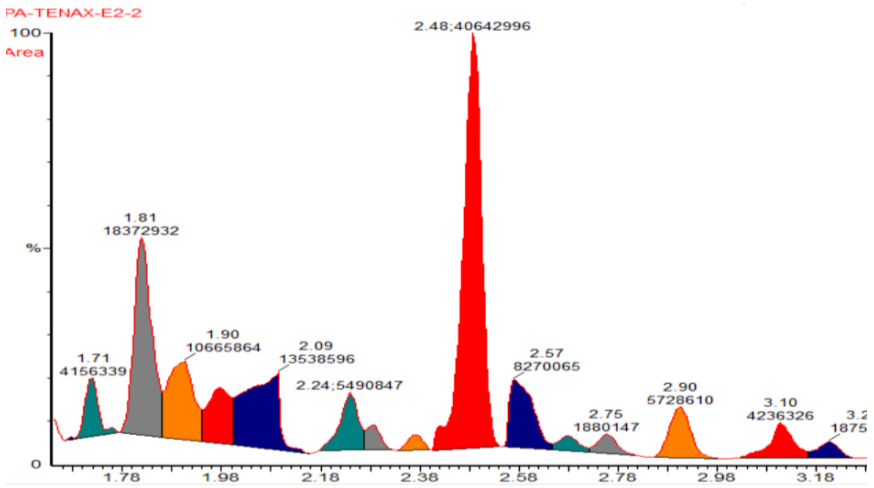


Fig. 26 : Fonction d'intégration du logiciel pour le calcul de l'aire des pics

L'aire des 9 composés est liée à la quantité de gaz prélevé et adsorbé dans le tube Tenax. Les prélèvements de l'enceinte E2 correspondent à 2 volumes d'échantillonnage (2 coups de pompe), c'est pourquoi les aires de E2 sont divisées par 2 (notée $E2_{cor}$). Un calcul du rapport : Aire de E1/ Aire de $E2_{cor}$ est ensuite réalisé pour chaque composé chimique. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus sur deux essais (2 et 4) effectués en absence de cagoule.

SANS CAGOULE Nom chimique du composé	Aires des pics Essai 2		RAPPORT $E1/E2_{cor}$ ESSAI 2	Aires des pics Essai 4		RAPPORT $E1/E2_{cor}$ ESSAI 4
	E1	$E2_{cor}$		E1	$E2_{cor}$	
BENZENE	56549212	20321498	**2.8**	57506080	13313796	**4.3**
BENZENE, METHYL TOLUENE	46017964	13506575	**3.4**	61350552	15725777	**3.9**
2-FURANCARBOXALDEHYDE FURFURAL	15389644	5837616	**2.6**	46317944	13263477	**3.5**
BENZENE, 1,3-DIMETHYL M-XYLENE	15874087	4872953	**3.3**	26700822	7291300	**3.7**
1-NONENE	3313657	809462.5	**4.1**	4372321	1123727.5	**3.9**
ALPHA-PINENE	33407622	11824028	**2.8**	165603328	38188388	**4.3**
BICYCLO[3.1.1]HEPTANE, 6,6-DIMETHYL-2-ME	26010138	9222764	**2.8**	213725920	46004880	**4.6**
BETA-PINENE	37744328	11737225	**3.2**	73310832	18137116	**4.0**
D-LIMONENE	21527404	6338037.5	**3.4**	72718704	19459862	**3.7**
Rapport moyen sans cagoule			**3.2**			**4.0**
Ecart type associé			0.5			0.4

Tableau 19 : Récapitulatif des aires des 9 composés retenus en absence de cagoule

Le rapport moyen des aires $E1/E2_{cor}$ calculé sur les 9 molécules est de 3.2 pour l'essai 2 contre 4.0 pour l'essai 4. Les écarts types associés à chaque essai sont de 0.5 et 0.4 respectivement. **En absence de cagoule, le rapport moyen des aires de E1/E2 est donc de 3.6, associé à un écart type de 0.6.**

Le même calcul réalisé en présence de la cagoule est présenté dans le tableau ci-après :

AVEC CAGOULE Nom chimique du composé	Aires des pics Essai 1		RAPPORT $E1/E2_{cor}$ ESSAI 1	Aires des pics Essai 3		RAPPORT $E1/E2_{cor}$ ESSAI 3
	E1	$E2_{cor}$		E1	$E2_{cor}$	
BENZENE	166809712	66513472	**2.5**	36871320	*interférence*	-
BENZENE, METHYL TOLUENE	101918744	39415932	**2.6**	33806016	6424602	**5.3**
2-FURANCARBOXALDEHYDE FURFURAL	45439744	16277522	**2.8**	21121902	12493142	**1.7**
BENZENE, 1,3-DIMETHYL M-XYLENE	35619251	14060146	**2.5**	14238667	3479358	**4.1**
1-NONENE	6558304	2278061	**2.9**	2554395	782611	**3.3**
ALPHA-PINENE	66490004	19195530	**3.5**	54480944	7180420.5	**7.6**
BICYCLO[3.1.1]HEPTANE, 6,6-DIMETHYL-2-ME	90303656	25621656	**3.5**	71530224	13513784	**5.3**
BETA-PINENE	91176208	26191682	**3.5**	37629556	16517487	**2.3**
D-LIMONENE	52489556	15401451	**3.4**	30310250	10787876	**2.8**
Rapport Moyen avec cagoule			**3.0**			**4.4**
Ecart type associé			0.4			1.9

Tableau 20 : Récapitulatif des aires des 9 composés retenus en présence de cagoule

En présence de la cagoule, le rapport moyen des aires de $E1/E2_{cor}$ est de 3.0 pour l'essai 1 contre 4.4 pour l'essai 3, associé à des écarts types de 0.4 et 1.9 respectivement. La variabilité plus élevée du rapport $E2/E2_{cor}$ dans l'essai 3 est attribuée à une pollution interne au niveau du système GC-MS. **En présence de la cagoule, le rapport moyen des aires de E1/E2 est de 3.7, associé à un écart type de 1.0.**

Conclusion :

D'après ces résultats, la présence de la cagoule ne modifie pas le rapport moyen des aires obtenues pour $E1/E2_{cor}$. Par conséquent, elle ne conduit pas à une réduction des quantités de molécules gazeuses pénétrant dans la deuxième enceinte E2.

4-3-3-2 Estimation des concentrations en BTEX dans les fumées

Les BTEX sont des composés benzéniques qui comprennent le Benzène, le Toluène, l'Ethylbenzène et les Xylènes. L'analyse des fumées a démontré leur présence dans tous les échantillons prélevés. Pour estimer les concentrations de BTEX dans les prélèvements de fumées, un mélange étalon à la concentration de 200 µg/ml est utilisé. Une prise d'essai de 2 µl est introduite dans un tube Tenax propre qui correspond à une quantité de 0.4 µg de BTEX. On obtient le chromatogramme ci-dessous.

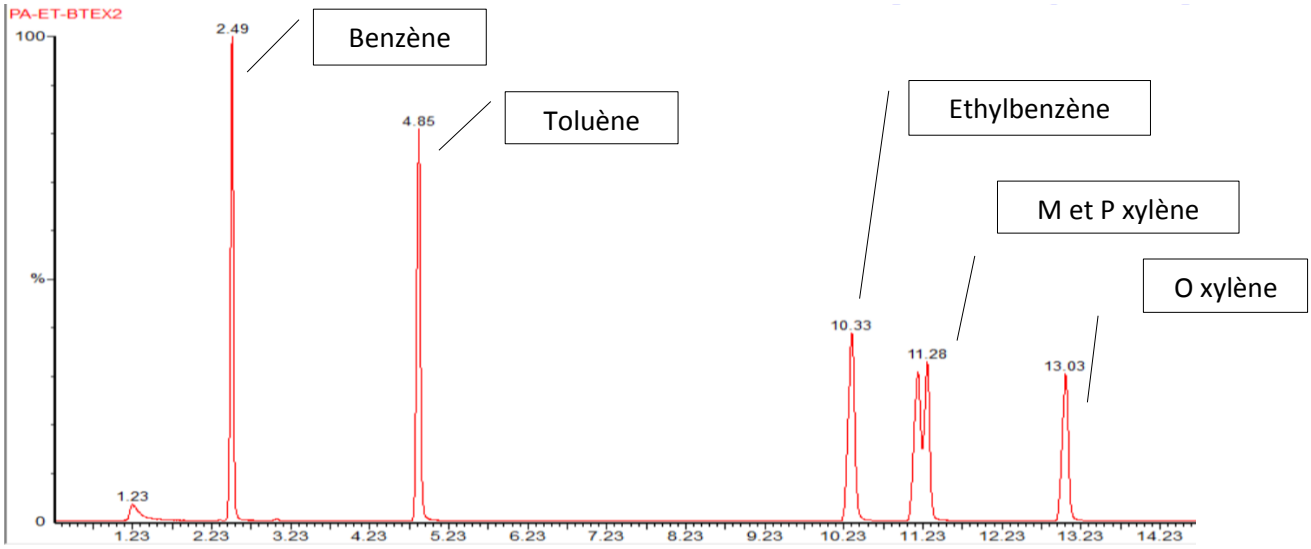


Fig. 27 : Chromatogramme de l'étalon de BTEX correspondant à 0.4 µg

L'aire de chaque molécule correspondant à la quantité de BTEX étalon introduite est répertoriée ci-après. Le P et le O Xylène de l'étalon ne sont pas pris en compte car absents des prélèvements.

SOLUTION Etalon	PRISE D'ESSAI	Masse étalon introduite	AIRES DES PICS DU CHROMATOGRAMME			
			BENZENE	TOLUENE	ETHYLBENZENE	M-XYLENE
BTEX	2µl	0.40 µg	48211924	51928592	42411316	30342642

Tableau 21 : Correspondance entre l'aire des BTEX et la quantité introduite

La correspondance de ces aires en quantité de BTEX tient compte du volume d'air prélevé et de l'intervalle de proportionnalité de la réponse du système GC-MS qui est compris entre 0 et 6 10^8. C'est pourquoi toutes les aires qui dépassent ce seuil ne sont pas pris en compte dans l'évaluation des concentrations.

Le relevé des aires des BTEX dans les prélèvements est noté dans le tableau ci-dessous.

Aires BTEX	Avec cagoule		Sans cagoule		Avec cagoule		Sans cagoule	
	E1-1	E2-1	E1-2	E2-2	E1-3	E2-3	E1-4	E2-4
Benzène	166809715	66513472	56549212	40642996	36871320	8319489	57506080	26627592
Toluène	101918744	39415932	46017964	27013150	33806016	12849204	61350552	31451554
Ethylbenzène	16575510	6271394	6689598	4066212	4623896	2154711	8674405	3926516
M-xylène	30886050	14060146	13544495	8341591	12331421	6958716	26700822	12560136

Tableau 22 : Aires des pics de BTEX dans les prélèvements

Un exemple de calcul est détaillé ci-dessous.

Quantité de BTEX = (aire du pic de l'échantillon /aire étalon) x 0.4

Concentration en BTEX = (quantité BTEX x 1000) / Volume prélevé ml

La concentration des BTEX en µg/l ou mg/m^3 dans les différents prélèvements est récapitulée ci-dessous.

Concentration µg/l d'air ou mg/m^3	Avec cagoule				Sans cagoule			
	E1-1	E2-1	E1-3	E2-3	E1-2	E2-2	E1-4	E2-4
Benzène	-	-	3.1	0.3	4.7	1.7	4.8	1.1
Toluène	-	1.5	2.6	0.5	3.5	1.0	-	1.2
Ethylbenzène	1.6	0.3	0.4	0.1	0.6	0.2	0.8	0.2
M-xylène	4.1	0.9	1.6	0.5	1.8	0.3	3.5	0.8

Tableau 23 : Concentration en BTEX dans les prélèvements

Le calcul des concentrations moyennes en BTEX est donné ci-dessous dans les deux enceintes et pour chaque modalité.

Concentrations moyennes en BTEX µg/l ou mg/m^3	Enceinte E1	*Ecart type E1*	Enceinte E2 Sans cagoule	Ecart type E2 sans	Enceinte E2 Avec cagoule	*Ecart type E2 avec*
Benzène	**4.2**	*1.0*	**1.4**	*0.4*	**0.3**	-
Toluène	**3.1**	*0.6*	**1.1**	*0.1*	**1.0**	*0.7*
Ethylbenzène	**0.6**	*0.2*	**0.2**	*0.0*	**0.2**	*0.1*
M-xylène	**2.3**	*1.0*	**0.7**	*0.2*	**0.7**	*0.3*

Tableau 24 : Concentration moyennes en BTEX dans les différentes modalités

La fumée initiale (E1) contient une concentration moyenne élevée en Benzène, Toluène et M Xylène avec **4.2, 3.6 et 2.3 mg/m^3** respectivement, associé à une variabilité importante sur le dosage du benzène et du toluène.

Rappelons à titre d'information que les seuils d'exposition règlementaires sur 8 heures de travail sont de **3.25 mg/m^3** pour le benzène**, 192 mg/m^3** pour le Toluène, **88.4 mg/m^3** pour l'Ethylbenzène et de **221 mg/m^3** pour le M-xylène (INRS).

Dans l'enceinte E2, les concentrations moyennes sont inférieures du fait de la dilution. La présence de la cagoule ne modifie pas les concentrations du toluène, de l'éthylbenzène ni du M-xylène. Quant à la concentration en benzène, est plus faible mais n'est pas représentative d'une valeur moyenne.

Le niveau d'exposition tient compte à la fois des concentrations ambiantes en BTEX et de la durée d'exposition des personnels. L'évaluation des niveaux d'exposition auxquels sont soumis les sapeurs-pompiers nécessite un suivi sur le terrain dans les conditions réelles de travail.

Conclusions :

L'estimation des concentrations en BTEX met en évidence la dangerosité des fumées potentiellement inhalées et démontre à nouveau l'inefficacité de filtration de la cagoule feux de forêts vis-à-vis de ces composés.

5- ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Le dispositif de test en laboratoire est maintenant utilisé pour estimer l'efficacité de la filtration des demi-masques anti-poussières actuellement disponibles sur le marché. Ces essais complémentaires sont une base de comparaison pour l'estimation d'une filtration à priori plus efficace que la cagoule. Ce type de masques ne saurait représenter une solution pour les pompiers, compte tenu de leur faible résistance thermique. Ils sont en effet constitués de polymères qui fondent rapidement sous l'effet de la chaleur.

5-1 Présentation des demi-masques anti-poussières

Les demi-masques anti-poussières jetables utilisés pour la protection des voies respiratoires sont des appareils filtrant les aérosols qui enveloppent le nez, la bouche et le menton. Ils s'ajustent au visage par un pince-nez et deux brides élastiques pour la tête. La surface filtrante est munie d'une soupape expiratoire située au centre de la pièce faciale.

5-1-1 Classification

Ils sont classés en trois catégories : FFP1, FFP2 et FFP3 (FFP pour *filtering facepeice particles*), selon la norme **EN 149 + A1 de 2001**. Ces trois classes sont définies par rapport aux performances de filtration vis-à-vis d'un aérosol de chlorure de sodium dont les particules ne dépassent pas 0.6 µm de diamètre ainsi que d'un aérosol d'huile de paraffine dont le diamètre des particules n'excède pas 0.4 µm. Le tableau ci-dessous précise les performances de filtration et de pénétration correspondant à chaque classe.

Classes filtrantes	FFP1	FFP2	FFP3
Classes d'efficacité	Faible	Moyenne	Haute
Capacité de filtration	≥ 80%	≥ 94%	≥ 99.95%
Pénétration	< 20%	< 6%	< 1%

Tableau 25 : Présentation des performances filtrantes et classification des masques anti-poussières

L'efficacité de la filtration est limitée dans le temps en fonction du taux de saturation du filtre. Au fur et à mesure que le filtre se colmate, la résistance au passage de l'air augmente et entraîne une gêne respiratoire. Il faut alors prévoir son remplacement.

5-1-2 Mode de fonctionnement

Le mécanisme général de filtration des aérosols qui dépend de la taille des particules et de la structure fibreuse du matériau est régi par quatre phénomènes : la diffusion brownienne, l'interception directe, les forces électrostatiques et l'impact inertiel.

La **diffusion brownienne** correspond à l'agitation désordonnée des particules de diamètre inférieure à 0.1µm, dont les trajectoires aléatoires peuvent entrer en contact avec les fibres et y adhérer.

L'interception directe se produit quand les particules de diamètre supérieur à 0.1 µm s'approchent d'une fibre et s'y accrochent grâce aux forces de Van der Waals.

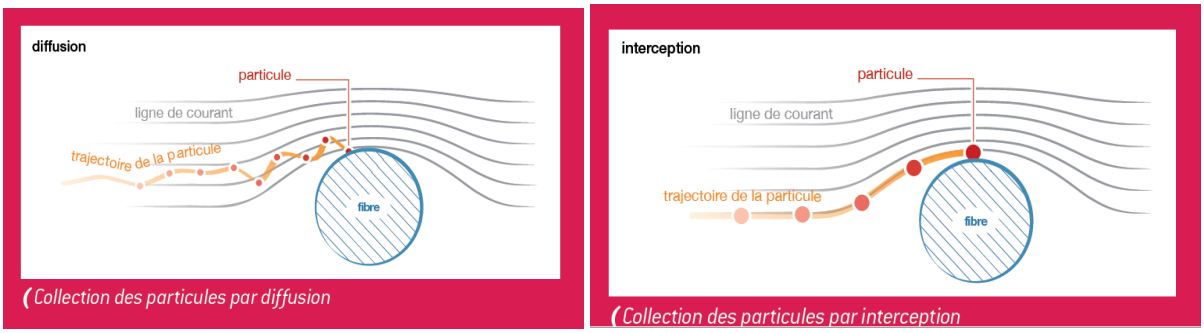


Fig. 28 : Schématisation des phénomènes de diffusion et d'interception qui régissent la filtration (Source INRS)

Par ailleurs, les **forces électrostatiques** contribuent à dévier les particules et les attirer vers les fibres. Leur état de charge respectif détermine leur adhérence mutuelle.

Enfin, **l'impact inertiel ou impaction**, concerne les plus grosses particules de diamètre supérieur à 1 µm et dont la trajectoire impacte directement les fibres.

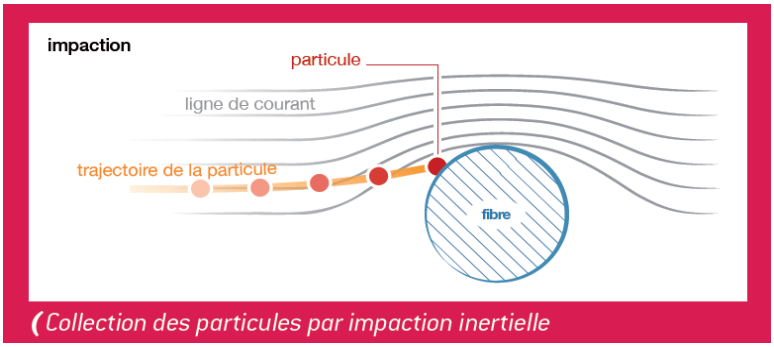


Fig. 29 : Schématisation du phénomène d'impaction qui régit la filtration
(Source INRS)

L'efficacité globale de la filtration résulte de ces différents mécanismes d'interactions en fonction de la taille et de la charge électrostatique des particules.

5-1-3 Identification et marquage

Outre le marquage CE, l'indication de classe (FFP1, FFP2 et FFP3) et la référence à la norme, le marquage comporte également l'indication sur la réutilisation éventuelle, avec R pour réutilisable et NR pour non réutilisable. La résistance au colmatage est indiquée par la lettre D (pour Dolomie) et correspond à un test de colmatage dans des conditions spécifiques.

Le demi-masque de classe FFP1 utilisé est de la marque **3M** avec valve. Les demi-masques FFP2 et FFP3 avec valve sont fabriqués par **Dasheng** et comportent également les mentions : « D » et « NR ».

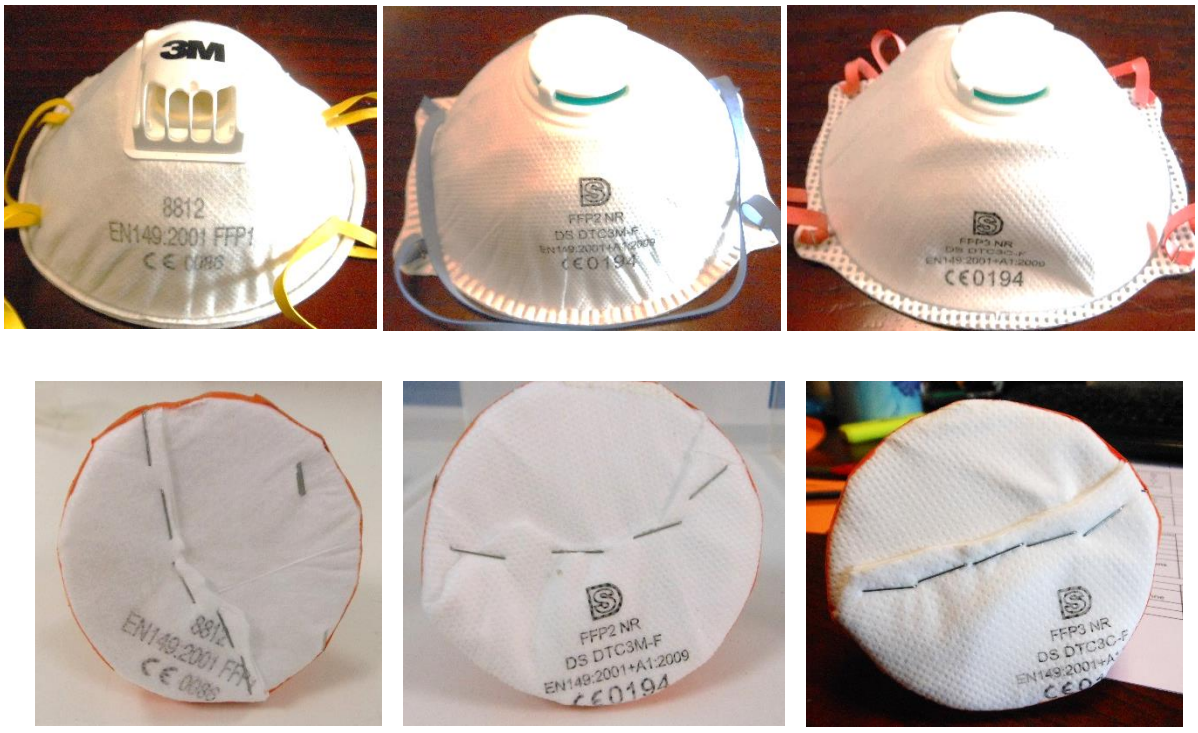


Fig. 30 : Demi-masques anti-poussières utilisés

Pour les besoins de l'expérimentation, la valve, le pince-nez et les brides sont retirés pour ne conserver que la partie filtrante. Le filtre est ensuite refermé hermétiquement par des agrafes et placé sur le support de fixation.

5-2 Résultats des essais réalisés

Les demi-masques sont testés vis-à-vis des particules fines et des composés gazeux selon les méthodologies décrites dans les paragraphes 2 et 3.

5-2-1 Dosage des particules fines

5-2-1-1 Demi-masque de type FFP1

Trois essais successifs sont effectués avec le même filtre FFP1. Les tableaux de résultats des concentrations en particules fines par taille sont présentés ci-après.

A chaque utilisation, le filtre s'encrasse et change de couleur. A la fin des trois essais, il est de couleur brun clair.

Fig. 31 : Encrassement du masque anti-poussières FFP1 après utilisation

Il est fait une mesure des particules dans l'enceinte E1 et E2 ainsi que le rapport E1/E2 par taille de particule. La somme et le rapport des 4 fractions massiques obtenues sont également calculés. Les résultats des mesures en présence du masque FFP1 sont présentés ci-dessous.

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	137	18.3	7.5
	4	120	17.0	7.1
	2.5	125	12.7	9.8
	1	121	14.5	8.3
Somme des fractions massiques		**503**	**62.5**	**8.0**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	94.9	10.8	8.8
	4	92.4	9.96	9.3
	2.5	88.2	11.2	7.9
	1	71.6	11.5	6.2
Somme des fractions massiques		**347**	**43.5**	**8.0**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	175	16.1	10.9
	4	155	14.5	10.7
	2.5	133	17.5	7.6
	1	166	15.6	10.6
Somme des fractions massiques		**629**	**63.7**	**9.9**

Tableau 26 : Résultats des mesures de particules fines en présence du masque FFP1

Le rapport moyen de la somme des fractions massiques obtenues dans E1 et E2 est de **8.6,** associé à un écart type de 1.1. Le filtre FFP1 intercepte **3.6** fois plus de particules que la cagoule feux de forêts, avec un pourcentage de transfert de **11.7%** en moyenne. Le colmatage du filtre n'est pas visible après 30 s d'utilisation, car le rapport ne diminue pas entre les trois séries. Les différentes tailles de particules sont interceptées indifféremment car le rapport moyen E1/E2 par taille de particules varie peu.

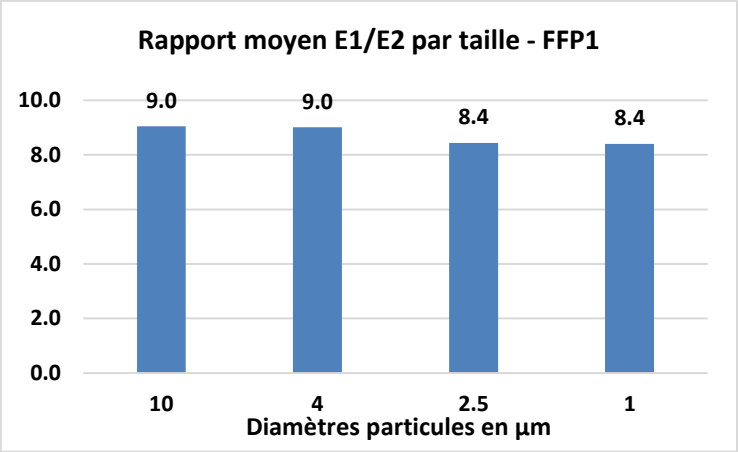


Fig. 32 : Représentation graphique du rapport moyen E1/E2 par tailles de particules – FFP1

5-2-1-2 Demi-masque de type FFP2

Le dosage des particules fines en présence d'un filtre de type FFP2, met en évidence des performances de filtration accrues. Le brunissement du filtre est bien visible après trois utilisations.

Fig. 33 : Encrassement du masque anti-poussières FFP2 après utilisation

Les résultats sont rassemblés ci-après.

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	95.4	3.37	28.3
	4	68.0	2.22	30.6
	2.5	86.3	2.52	34.2
	1	73.6	2.75	26.8
Somme des fractions massiques		**323**	**10.9**	**29.8**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	176	5.75	30.6
	4	146	4.20	34.8
	2.5	171	4.97	34.4
	1	152	5.10	29.8
Somme des fractions massiques		**645**	**20.0**	**32.2**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	110	2.73	40.3
	4	82.6	3.07	26.9
	2.5	106	2.98	35.6
	1	73.3	2.39	30.7
Somme des fractions massiques		**372**	**11.2**	**33.3**

Tableau 27 : Résultats des mesures de particules fines en présence du masque FFP2

Le rapport massique global E1/E2 est à nouveau augmenté avec une valeur moyenne de **31.8** associé à un écart type de 1.8. Il est **13.3** fois plus filtrant que la cagoule feux de forêts. Le pourcentage de transfert diminue à **3.2%** en moyenne. Le filtre ne semble pas saturé malgré un changement de coloration car le rapport ne diminue pas après 30 s d'utilisation. Les particules sont interceptées indifféremment par rapport à leur taille, les variations observées étant liées à la variabilité intrinsèque des résultats (écart types par taille de 3.3).

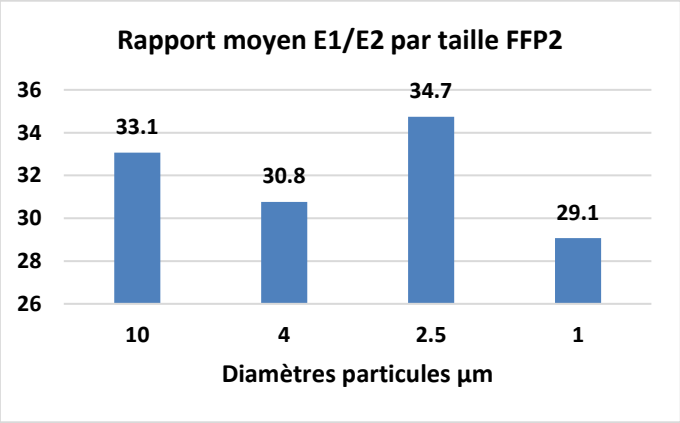


Fig. 34 : Représentation graphique du rapport moyen E1/E2 par tailles de particules – FFP2

5-2-1-3 Demi-masque de type FFP3

Pour le masque de type FFP3, dont on attend une capacité de filtration supérieure, un quatrième essai est rajouté afin de vérifier un éventuel colmatage après 40 s d'utilisation. Le brunissement du filtre se fait également rapidement.

Fig. 35 : Encrassement du masque anti-poussières FFP3 après utilisation

Les résultats des mesures sont rassemblés ci-dessous.

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2
10	10	356	2.66	133.8
	4	337	1.51	223.2
	2.5	315	2.55	123.5
	1	388	1.70	228.2
Somme des fractions massiques		**1396**	**8.4**	**165.8**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	156	0.99	157.6
	4	157	1.10	142.7
	2.5	180	0.87	206.9
	1	173	0.86	201.2
Somme des fractions massiques		**666**	**3.8**	**174.3**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	338	1.79	188.8
	4	319	1.76	181.3
	2.5	270	1.46	184.9
	1	242	1.70	142.4
Somme des fractions massiques		**1169**	**6.7**	**174.2**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1	E2	RAPPORT E1/E2
10	10	169	1.05	161.0
	4	169	1.16	145.7
	2.5	152	0.84	181.0
	1	161	0.79	203.8
Somme des fractions massiques		**651**	**3.8**	**169.5**

Tableau 28 : Résultats des mesures de particules fines en présence du masque FFP3

Le rapport moyen de la somme des fractions massiques entre E1 et E2 est atteint une valeur de **171**, associé à un écart type de 4.1. Ce rapport est **71.3** fois plus important que celui obtenue avec la cagoule. Le pourcentage de transfert des particules est en moyenne de **0.6%.** Ce résultat confirme l'efficacité d'interception du masque FFP3. Aucun colmatage n'est pas perceptible après 40s d'utilisation. Là encore, le filtre intercepte les particules indifféremment de leur diamètre respectif (avec un écart type moyen par taille de 34).

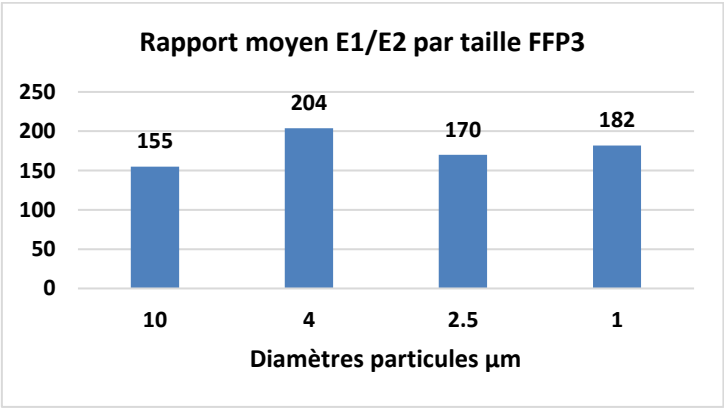


Fig. 36 : Représentation graphique du rapport moyen E1/E2 par tailles de particules – FFP3

Conclusions :

Les masques anti-poussières testés dans nos conditions expérimentales interceptent efficacement les particules fines contenues dans la fumée, contrairement à la cagoule feux de forêts qui est inopérante pour cette fonction. Les différents rapports E1/E2 des fractions massiques globales sont représentés ci-dessous.

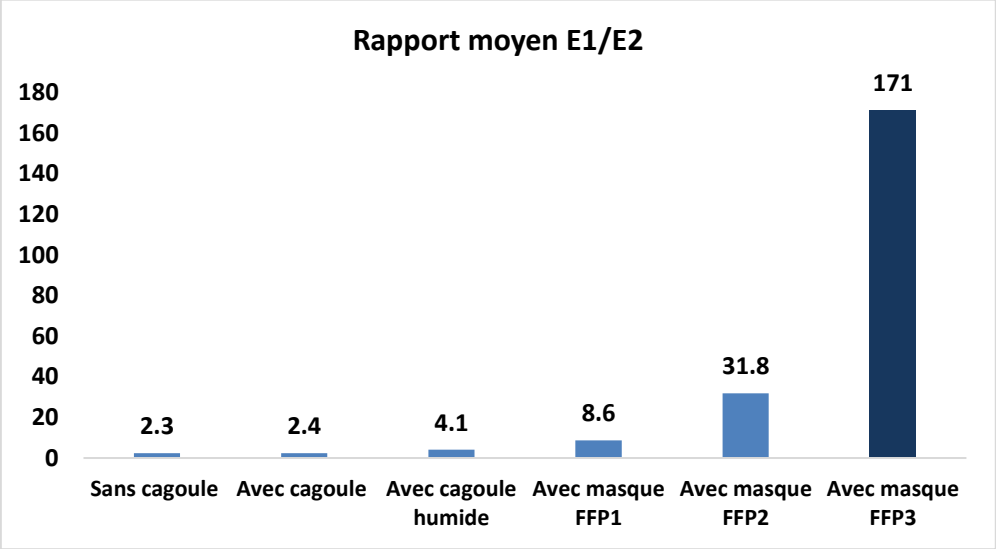


Fig. 37 : Représentation graphique des rapports E1/E2 pour les différentes modalités

Plus le rapport augmente, plus la filtration des particules fines est efficace. En représentant le pourcentage moyen de particules fines transférées de l'enceinte E1 vers l'enceinte E2, on obtient le graphe ci-dessous.

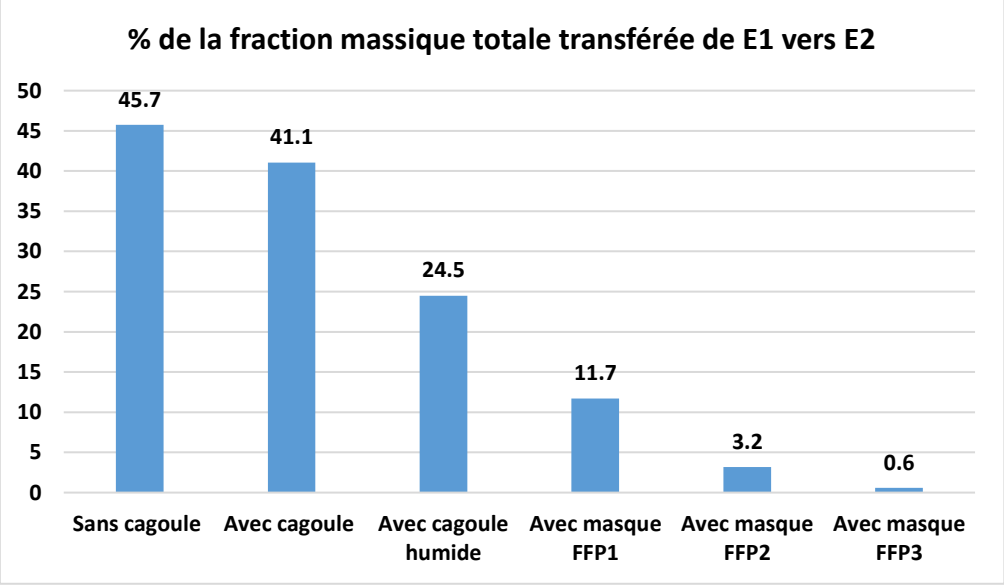


Fig. 38 : Représentation du pourcentage de la fraction massique totale transférée de E1 vers E2

En absence de cagoule de protection, le dispositif d'aspiration permet de transférer vers E2 **45.7%** des particules contenues dans le compartiment E1. Compte tenu de la variabilité intrinsèque de la mesure, le résultat de **41.1%** obtenu avec la cagoule peut être considéré comme équivalent. L'humidification de la cagoule permet de réduire d'environ **17%** le transfert des particules vers E2.

A titre de comparaison, ce pourcentage de transfert de E1 vers E2 s'atténue encore davantage en présence des masques anti-poussières avec 11.7%, 3.2% et 0.6% pour les types FFP1, FFP2 et FFP3 respectivement.

En prenant cette fois ci comme référence le pourcentage de transfert sans cagoule et en exprimant les résultats de manière inversée, il est possible d'estimer le taux d'interception des particules fines pour chaque modalité.

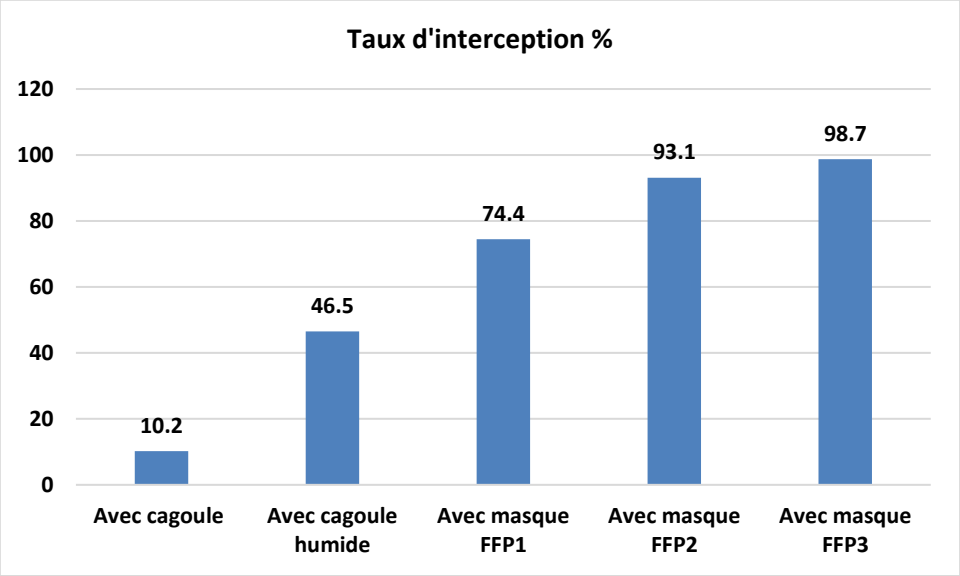


Fig. 39 : Représentation du taux d'interception des particules par modalité

Le taux d'interception de la cagoule est alors estimé à 10%. En présence d'humidité, la cagoule intercepte 46.5% des particules qui traversent le dispositif. Il augmente encore à 74.4, 93.1 et 98.7% pour les maques FFP1, FFP2 et FFP3 respectivement.

5-2-2 Analyse de la composition des fumées

L'analyse de la fumée ayant traversée les masques anti-poussières est réalisée par GC-MS et comparée à la fumée initiale prélevée dans l'enceinte E1.

5-2-2-1 Demi-masque de type FFP1

Le masque anti-poussières de type FFP1 laisse passer les toutes molécules chimiques contenues dans la fumée initiale. Après analyse, les spectres chromatographiques sont en effet identiques dans les deux enceintes E1 et E2.

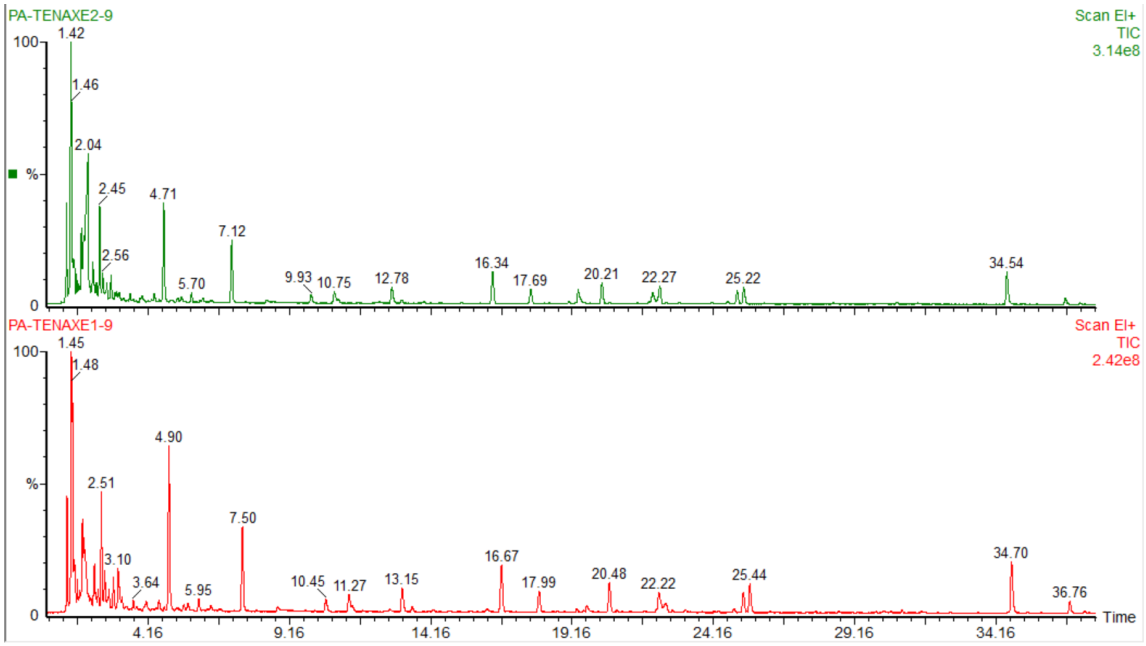


Fig. 40 : Chromatogramme des prélèvements de E1 et E2 en présence d'un masque FFP1

On retrouve ainsi, les différentes familles de molécules comme les BTEX, les terpènes, les aldéhydes et les alcènes, cité précédemment.

5-2-2-2 Demi-masque de type FFP2

Il en va de même pour le masque de type FFP2 dont les chromatogrammes sont équivalents d'un compartiment à l'autre. Leur analyse respective révèle cependant que trois pics ont disparu dans l'enceinte E2. Il s'agit de trois esters d'acides : carbonic acid dimethyl ester (ou diméthyl carbonate), sulfurous acid, dimethyl ester (ou diméthyl sulfite) et benzoic acid methyl ester (ou méthyl benzoate), dont les temps de rétention sont respectivement de 2.02, 3.81 et 30.64 min.

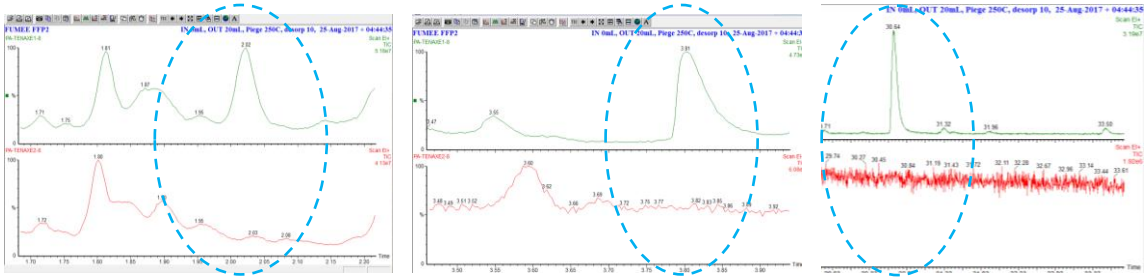
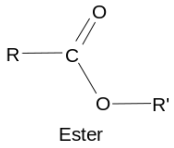


Fig. 41 : Disparition de trois esters après filtration de la fumée par un masque FFP2

Leur structure chimique est présentée ci-dessous avec comme point commun, la fonction ester :



Ester

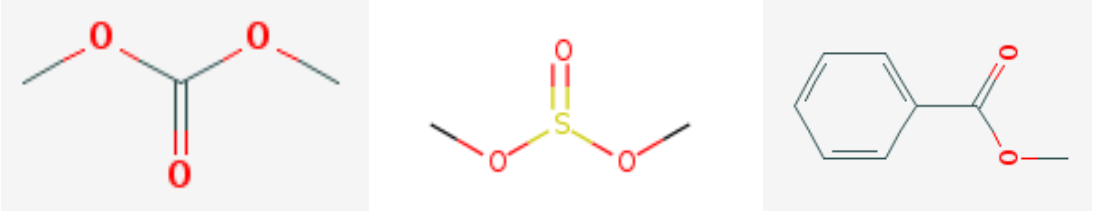


Fig. 42 : Structure chimique des trois esters retenus spécifiquement par le masque FFP2

5-2-2-3 Demi-masque de type FFP3

Le même phénomène est observé en présence du masque FFP3. En effet, l'analyse des composés présents dans les deux enceintes E1 et E2 après filtration met en évidence la disparition de deux ester d'acides : acetic acid methyl ester (méthyl acétate) et propanoic acid 2-oxo ethyl ester (ou ethyl pyruvate) dont les temps de rétention sont respectivement 5.48 et 12.44 min.

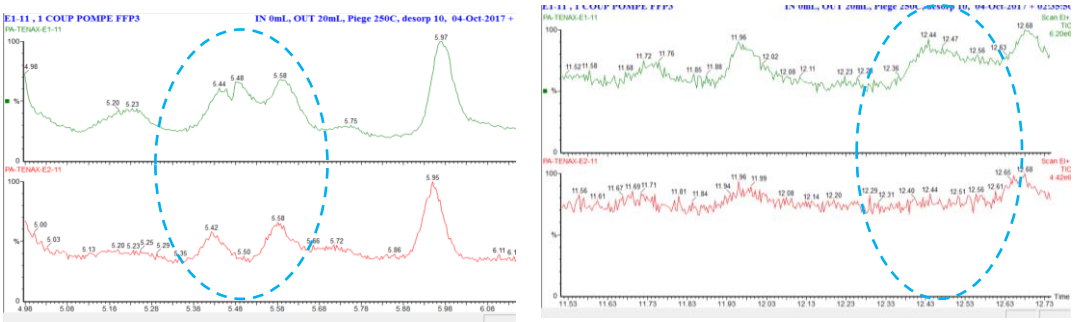


Fig. 43 : Disparition de deux esters après filtration des fumées par un masque FFP3

Leur structure chimique est également assez proche.

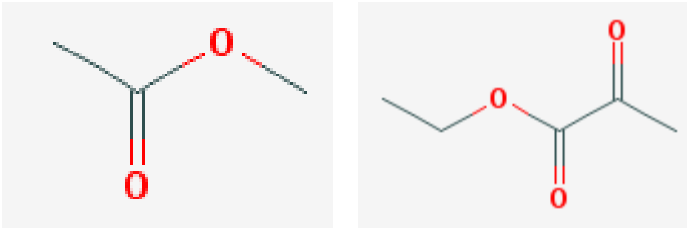


Fig. 44 : Structure chimique des deux esters retenu spécifiquement par le masque FFP3

Conclusions :

Les demi-masques anti-poussières sont performants pour filtrer les particules fines mais ils laissent passer la majorité des composés chimiques contenus dans les fumées. On note cependant que les filtres FFP2 et FFP3 retiennent spécifiquement certains composés de la famille des esters. Ceci laisse également supposer une probable rétention des acides carboxyliques car leur structure carboxyle est assez proche.

D'un point de vue quantitatif, le calcul des concentrations de BTEX par type de filtre ainsi que le rapport des concentrations E1/E2 est présenté ci-dessous.

Concentration µg/l	BENZENE			TOLUENE			ETHYLBENZENE			M-XYLENE			Rapport moyen	Ecart type moyen
	E1	E2	R E1/E2	E1	E2	R E1/E2	E1	E2	R E1/E2	E1	E2	R E1/E2		
FFP1	0.36	0.20	**1.8**	0.73	0.27	**2.7**	0.16	0.04	**2.4**	0.27	0.12	**2.2**	**2.3**	**0.4**
FFP2	0.55	0.28	**2.0**	0.57	0.35	**1.6**	0.07	0.04	**2.0**	0.21	0.08	**2.5**	**2.0**	**0.4**
FFP3	0.87	0.22	**3.9**	0.77	0.21	**3.7**	0.11	0.05	**4.3**	0.28	0.07	**4.2**	**4.0**	**0.3**

Tableau 29 : Estimations des concentrations de BTEX avant et après filtration par les masques anti-poussières

Ces résultats sont schématisés ci-dessous par un histogramme par type de molécule et de masque.

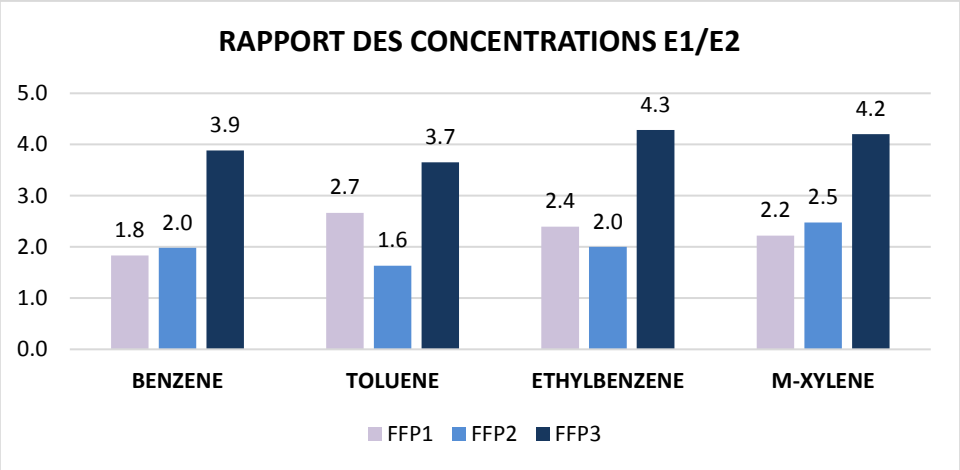


Fig. 45 : Histogramme des rapports E1/E2 des concentrations en BTEX, par type de masque

Les masques FFP1 et FFP2 présentent un rapport de concentration en BTEX équivalent avec une moyenne de 2.3 et 2.0 respectivement associé à un écart type de 0.4. Ce rapport est augmenté à 4 dans le cas du masque FFP3, ce qui traduit une efficacité supérieure en terme de filtration.

6- CONCLUSIONS PREMIERE PARTIE

L'ensemble des analyses effectuées en laboratoire démontrent que la cagoule utilisée sur feux de forêts ne filtre ni les composés chimiques, ni les particules fines contenues dans les fumées de végétation. Cependant, l'humidification des fibres textiles entraîne une diminution de la pénétration des particules fines sans pour autant stopper le passage des composés gazeux. Dans ces conditions, les personnels évoluant sur les feux de végétation ne sont aucunement protégés des composés toxiques, ni des particules fines émanant des fumées.

L'axe de travail suivant consiste à évaluer les niveaux d'exposition auxquels sont réellement exposés les personnels. Des tests sur brûlages dirigés mis en œuvre par le CEREN en collaboration avec le SDIS du Gard sont décrits dans la deuxième partie de ce document. Les données recueillies sur le terrain vont compléter les données de laboratoire et permettre de conclure quant à l'efficacité de protection de la cagoule vis-à-vis des particules fines et des composés chimiques inhalés par les personnels.

DEUXIEME PARTIE Essais sur brûlage dirigé, Mars - Avril 2017

1- PRESENTATION DES ESSAIS SUR BRÛLAGE DIRIGE

1-1 Objectifs

Cette deuxième partie de l'étude se propose de confirmer par des essais « in situ », les résultats précédents obtenus à l'échelle du laboratoire. La cagoule feux de forêt est testée dans les conditions d'un brûlage dirigé où les personnels sont exposés aux fumées de combustion d'une végétation, ainsi qu'aux hydrocarbures employés dans les torches d'allumage. La capacité de filtration de la cagoule est analysée vis-à-vis des particules fines et des composés chimiques contenus dans les fumées.

1-2 Localisation

Le brûlage est organisé en collaboration avec le S.D.I.S. du Gard et la caserne du Vigan, dans le cadre des formations « Feux tactiques », sous la direction du Lieutenant-Colonel Nicolas COSTE et de son équipe.

1-2-1 Cartographie

Localisée sur la commune de Dourbies, en limite du Gard et de l'Aveyron, la parcelle est située à 1200 m d'altitude sur un secteur fortement en pente, à proximité de la forêt domaniale de la Guerite.

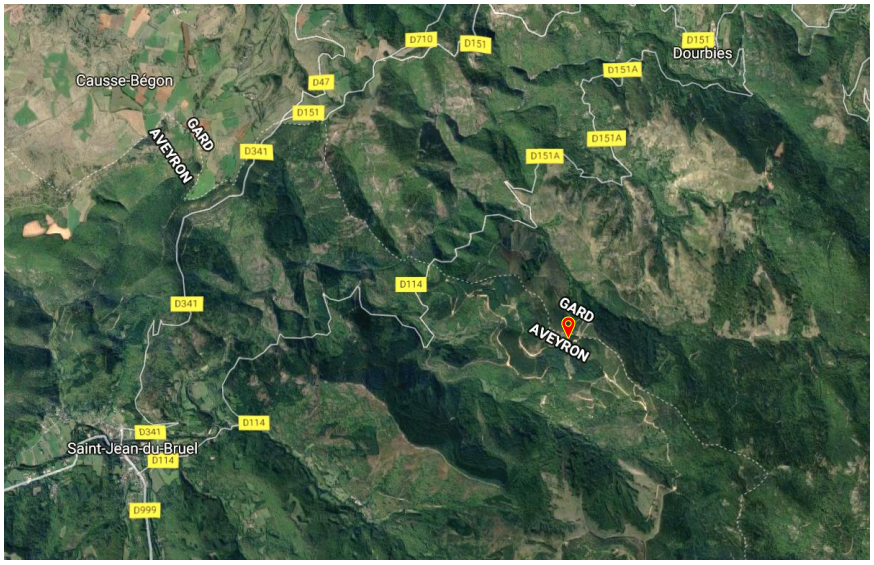


Fig.46 : Localisation de la parcelle de brûlage - Secteur Dourbies - Google Maps

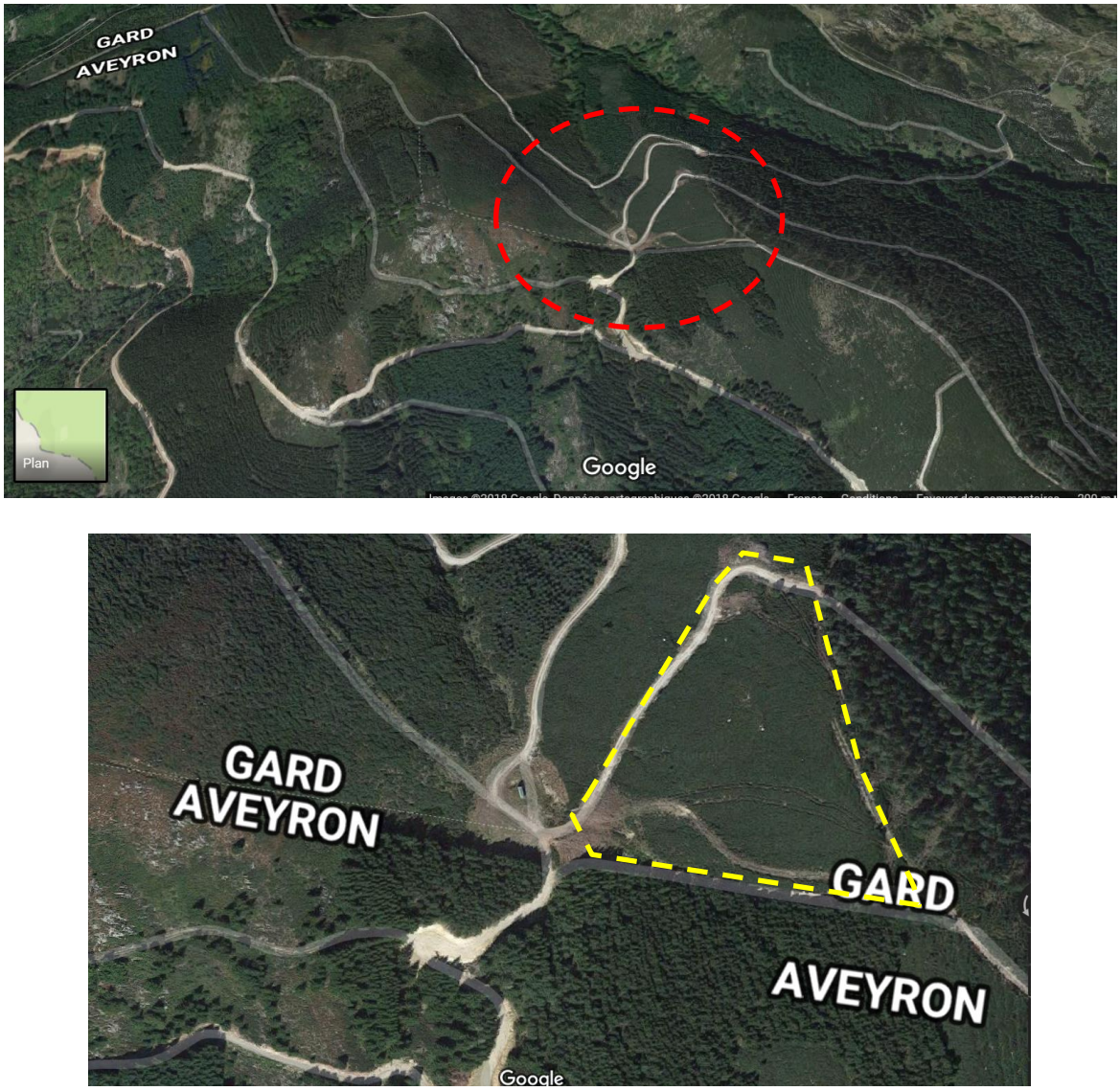


Fig.47 : Localisation de la parcelle de brûlage - en limite de la forêt Domaniale de la Guerite Coordonnées DFCI GD88D6.5 (suite)

Le versant proposé pour le brûlage se situe en terrain accidenté avec une pente supérieure à 30%, en lisière de la forêt domaniale, sur son côté sud.

1-2-2 Végétation et conditions météorologiques

Le secteur concerné par le brûlage est constitué principalement de genêts purgatifs en phase végétative, d'une hauteur comprise entre 50 et 90 cm. La litière d'herbacées n'est présente que lorsque la densité des genêts diminue.

Fig.48 : Landes de végétation à genêts purgatifs en phase végétative

La parcelle est préalablement préparée par les services de l'ONF grâce à une bande débroussaillée de 2 à 3 m de large sur le contour de la zone. Cette bande de sécurité favorise également l'accessibilité des personnels sur les différents côtés.

Les conditions météorologiques sont peu favorables. Le matin, la température ne dépasse pas 3°C, avec 70% d'hygrométrie. Le vent de secteur Nord-Ouest souffle à 10 km/h, puis passe au secteur Ouest en cours de journée. La température avant le brûlage remonte à 12°C tandis que l'hygrométrie diminue à 55%.

1-3 Déroulement

Le brûlage commence à 13 h dans le haut la parcelle dite « banane » située en bordure de la forêt domaniale (1). Avec une litière humide, les conditions de propagation sont difficiles et la propagation du feu se déroule lentement.

Fig.49 : Phases de brûlage de la parcelle

L'allumage à la recule est sans cesse renouvelé, puis il est procédé à l'allumage sur le bas de la parcelle (2) dans le sens montant. Les prélèvements sont effectués sous le vent, en bordure de zone (3). La fumée dégagée par la combustion des végétaux bien que rasante et intermittente s'avère suffisante pour effectuer les prélèvements dans de bonnes conditions.

Fig.50 : Phases de brûlage de la parcelle (suite)

Dans une deuxième partie, le brûlage est étendu à la zone contigüe, dont la surface est plus importante. La propagation reste cependant difficile et s'accompagne de panaches de fumées, soumis au vent montant et peu accessibles aux prélèvements.

2- INSTRUMENTATION MISE EN OEUVRE

2-1 Mesure des particules fines

Les mesures de particules fines sont réalisées avec le même appareillage décrit dans la phase de tests en laboratoire (cf.2-1-3-2, page 16). L'appareil est installé dans un casier portatif sur lequel est fixé l'élément de cagoule maintenu en double couche sur un support et relié par un tuyau à l'extrémité du tube d'aspiration du « Kit impacteur ».

Fig.51 : Appareil Dustrak portatif pour la mesure des particules fines en condition de terrain

Le tuyau est fixé au moment de la mesure puis retiré pour permettre le changement du « Kit impacteur » correspondant aux quatre diamètres de particules aspirées (10, 4, 2.5 et 1 µm). Les particules fines sont mesurées dans la fumée ambiante en absence de cagoule, puis la cagoule est rajoutée. Par ailleurs, un autre dispositif filtrant les particules fines est également testé dans les mêmes conditions ambiantes, ceci à des fins de comparaison des résultats.

Fig. 52 : Elément de cagoule à tester et dispositif filtrant les particules fines

La durée de chaque prélèvement est fixée à 1 min pour permettre à la fois la stabilisation du débit d'aspiration mais aussi pour mesurer les variations de densité de fumée selon l'orientation du vent et les phénomènes de combustion.

2-2 Analyses GC-MS de la composition des fumées

Parallèlement aux mesures de particules fines, les fumées de combustion sont prélevées sur tubes Tenax pour subir l'analyse GC-MS dès retour au laboratoire, selon la méthode décrite au paragraphe 2-1-3-3 p17.

L'aspiration de la fumée au moyen de la pompe de prélèvement s'effectue directement dans l'air ambiant par l'extrémité du tube Tenax, puis au travers de la cagoule placée en double couche au niveau de cette extrémité. Un prélèvement supplémentaire réalisé à travers le dispositif filtrant les particules fines sert également de comparatif.

Ces trois modalités de prélèvement sont réalisées au cœur d'un panache de fumée de faible densité où les yeux piquent légèrement, puis dans une fumée plus opaque où la respiration est difficile et où les yeux pleurent. Enfin, les derniers prélèvements sont effectués dans une fumée dense et épaisse, où l'atmosphère est quasi irrespirable.

Dans la suite du document la quantité de fumée ambiante est notée : « fumée faible », « fumée modérée » et « fumée dense » pour décrire ces trois conditions de prélèvement.

Fig.53 : Conditions de prélèvements en « fumée faible », « modérée » et « dense »

2-3 Dosage passif du CO et du Formaldéhyde

Les prélèvements sur le terrain concernent également le dosage du monoxyde de carbone CO et du Formaldéhyde, potentiellement inhalés par les personnels. L'estimation des doses est réalisée à titre informatif afin de compléter les données expérimentales.

Le dosage de ces gaz s'effectue toujours au moyen de tubes colorimétriques (cf.2-1-3-1, p15) mais la méthode est cette fois-ci passive, c'est-à-dire que les molécules ne pénètrent pas sous l'action d'une pompe, mais diffusent passivement à partir de l'air ambiant. La gamme de concentration dosée est respectivement de 0.1 à 20 ppm.hr pour le formaldéhyde et de 50 à 1000 ppm.hr pour le CO.

Ce mode de prélèvement passif permet de suivre l'exposition de 6 personnes pendant la durée du brûlage. Les deux tubes passifs sont préalablement protégés de la lumière par un fourreau en matériau isolant. Puis, ils sont ouverts et fixés sur la poche extérieure des vestes, juste avant le brûlage.

Fig.54 : Fixation des tubes passifs pour le dosage du CO et du Formaldéhyde

Les résultats sont ramenés à une dose d'exposition en tenant compte de la durée totale du brûlage.

3- RESULTATS

3-1 Exposition aux particules fines

Dans le cadre d'un brûlage dirigé, l'exposition des personnels aux particules fines peut être à la fois chronique et aigüe. Une exposition chronique est associée à des concentrations moyennes différentes selon l'intensité de la fumée ambiante.

3-1-1 Répartition des prélèvements

Au total 49 prélèvements de 1 min sont réalisés sur la durée totale du brûlage. Le graphique ci-dessous présente leur répartition respective pour chaque condition ambiante.

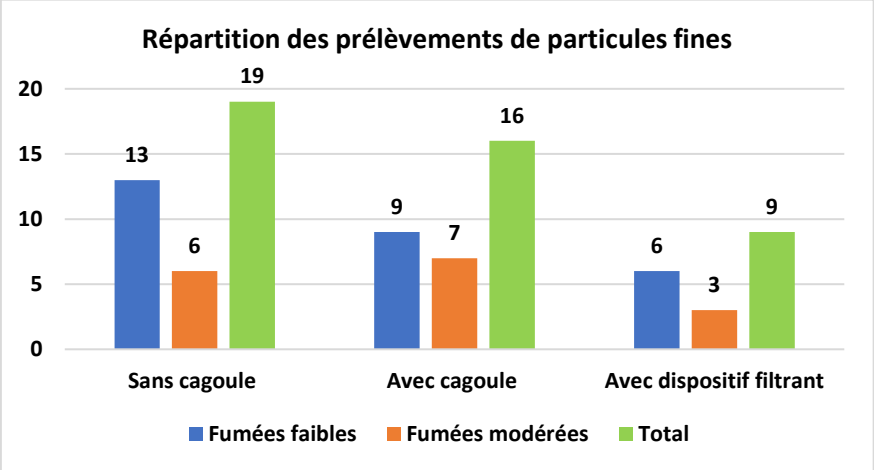


Fig.55 : Répartition des prélèvements de particules fines effectués sur le brûlage

19 prélèvements sans cagoule sont réalisés dont 13 dans la « fumée faible » et 6 dans la « fumée modérée ». Les prélèvements en présence de cagoule sont au nombre de 16 dont 9 dans la « fumée faible » et 7 dans la « fumée modérée ». Enfin, le dispositif filtrant est testé à 9 reprises, 6 fois en présence d'une « fumée faible » et 3 fois dans la « fumée modérée ». Les conditions de fumées denses ne sont pas obtenues sur le terrain.

La répartition des prélèvements selon le diamètre des particules fines est représentée ci-dessous.

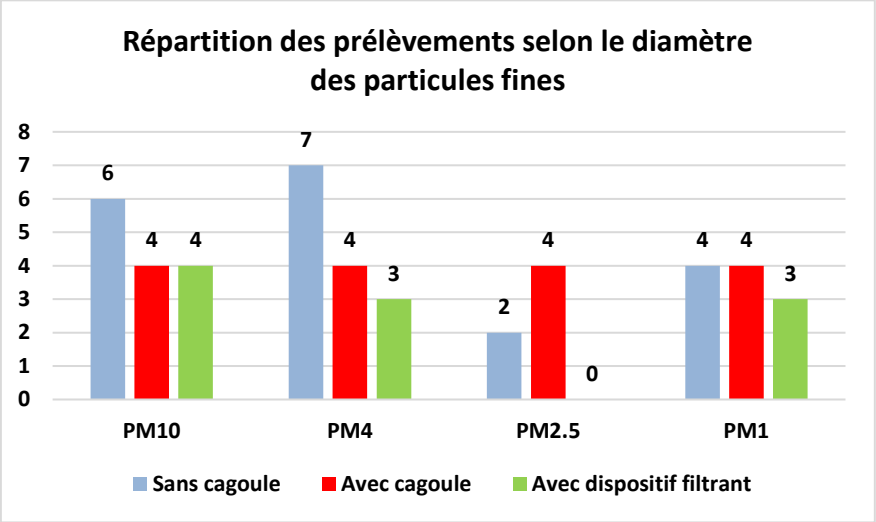


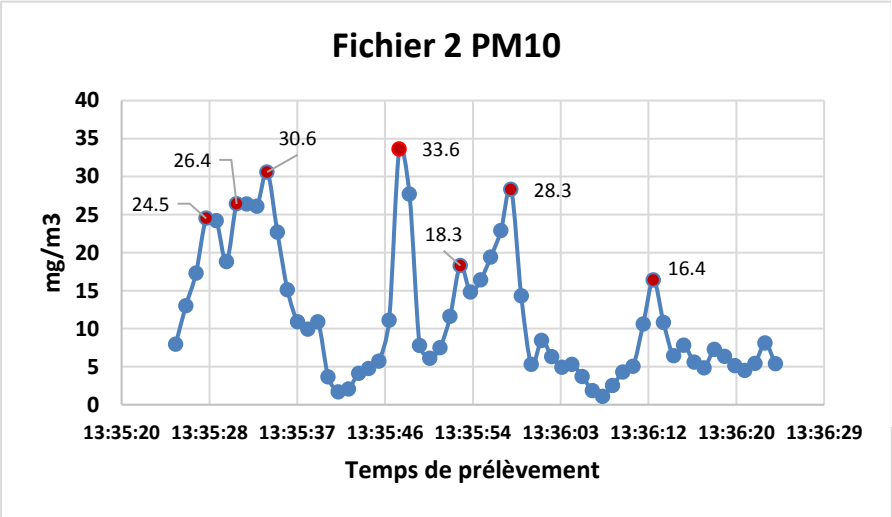
Fig.56 : Répartition des prélèvements selon le diamètre des particules fines

Les quatre diamètres de particules fines (10, 4, 2.5 et 1 µm) sont analysés dans les différentes modalités d'aspiration. Seule la taille de 2.5 µm n'est pas testée en présence du dispositif filtrant.

3-1-2 Traitement des résultats

Les fluctuations de la fumée, poussée par le vent dans les conditions de terrain, génèrent des oscillations dans les quantités de particules aspirées au cours du temps. Ceci indique que chaque prélèvement est unique, car réalisé dans une ambiance variable.

Un exemple d'enregistrement de la quantité de particules fines en mg/m^3 est représenté ci-dessous en fonction du temps.



	PM10 en crête
	24.2
	26.4
	30.6
	33.6
	18.3
	28.3
	16.4
Moyenne crête	25.4
Somme PM10 sur 1 min	700

Fig.57 : Exemple d'enregistrement des particules fines en mg/m^3

Pour rendre compte à la fois des concentrations maximales et des quantités totales potentiellement inhalées, chaque graphique fait l'objet d'un traitement de données. Tout d'abord, il est fait un relevé des valeurs de crête pour calculer la moyenne représentative. Des valeurs de crête inférieures ou égales à **10 mg/m^3** ne sont pas prises en comptes car non représentatives d'une fumée faible ou modérée.

Dans un deuxième temps, les concentrations mesurées chaque seconde sont additionnées pour fournir la quantité totale de particules fines aspirées pendant une minute. Une somme inférieure à **200 mg/m^3** n'est pas prise en compte car non représentative d'un panache de fumée constant pendant 1 minute.

Cette méthodologie est appliquée à l'ensemble des prélèvements.

Le tableau ci-dessous rassemble les résultats obtenus :

Diamètres particules	SANS CAGOULE			AVEC CAGOULE			AVEC DISPOSITIF FILTRANT	
	Moyenne crête	Somme	Diamètres particules	Moyenne crête	Somme	Diamètres particules	Moyenne crête	Somme
PM10	13.5	236	**PM10**	39.0	1057	**PM10**	1.7	41
PM10	25.4	700	**PM4**	22.9	712	**PM10**	0.03	1
PM4	72.3	2243	**PM2.5**	23.3	565	**PM10**	0.01	0.35
PM4	21.0	650	**PM2.5**	48.5	1181	**PM10**	0.03	0.54
PM2.5	24.6	728	**PM1**	27.0	783	**PM4**	0.9	24
PM1	24.0	1084	**PM1**	25.6	1015	**PM4**	0.021	0.7
PM1	86.3	3107	**PM1**	29.0	1099	**PM1**	0.319	5.2
PM2.5	22.5	749	**PM1**	34.5	549	**PM1**	0.035	0.9
PM4	34.3	759	**PM2.5**	59.4	1470	**PM1**	4.5	59.7
PM4	33.3	1036	**PM2.5**	26.3	666			
PM10	35.9	1264	**PM4**	44.8	1562			
PM10	28.2	638	**PM4**	24.1	657			
PM4	33.8	915	**PM10**	21.5	925			
PM4	16.2	267	**PM10**	43.6	1636			
PM4	16.6	516	**PM10**	24.0	360			
PM1	33.3	1309	**PM4**	16.6	689			

Tableau 30 : Résultats de la moyenne des valeurs de crête et de la somme obtenus pour chaque prélèvement

Les conditions ambiantes représentatives d'une « fumée faible » sont caractérisées par une quantité totale de particules fines inférieure à **1000 mg/m³** (en gris clair) tandis d'une « fumée modérée » présente une quantité totale comprise entre **1000 et 2000 mg/m³** (en gris foncé). Deux cas de fumées denses sont également identifiés avec des quantités totales supérieures à **2000 mg/m³** (en fond noir).

Ces résultats sont ensuite moyennés pour chaque diamètre de particules et chaque modalité testée, en distinguant uniquement les conditions de « fumée faible » et « modérée ».

3-1-3 Résultats en présence d'une « fumée faible »

Les résultats en présence d'une « fumée faible » sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Fumée faible	SANS CAGOULE		AVEC CAGOULE		AVEC DISPOSITIF FILTRANT	
	Moyenne crête	Somme	Moyenne crête	Somme	Moyenne crête	Somme
MOYENNE PM10	22	525	23	643	0.4	10.7
MOYENNE PM4	24	621	21	686	0.5	12.4
MOYENNE PM2.5	24	739	25	466		
MOYENNE PM1	-	-	31	666	1.6	21.9
Moyenne globale	***23***	***628***	***21***	***615***	***0.8***	***15***

Tableau 31 : Résultats moyennés pour chaque diamètre de particule et chaque modalité en conditions de « fumée faible »

Concentrations moyennes des valeurs de crête :

Les résultats obtenus pour chaque diamètre de particule sont représentés dans le graphe ci-dessous.

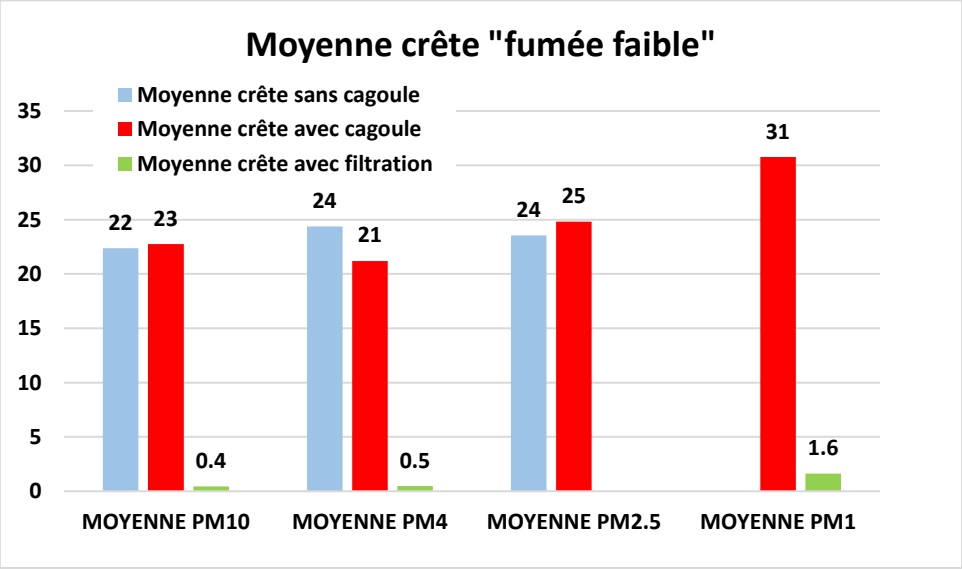


Fig.58 : Comparaison des moyennes des valeurs de crête selon le diamètre des particules fines et la modalité testée dans les conditions de « fumée faible »

Les concentrations en particules fines de diamètre 10 µm contenues dans la « fumée faible » sont équivalentes en présence et en absence de cagoule, avec des valeurs moyennes de crête de **23 et 22 mg/m³** respectivement. Le dispositif filtrant les particules fines permet de faire baisser la concentration à **0.4 mg/m³** dans les mêmes conditions ambiantes, soit une efficacité de filtration de **98%**.

Pour les particules PM4, les concentrations avec et sans cagoule sont également équivalentes et du même ordre de grandeur, tandis que le dispositif filtrant fait chuter la concentration moyenne à 0.5 mg/m^3, soit une baisse identique de 98%. Ces résultats indiquent que la cagoule ne permet pas non plus de filtrer les particules fines de diamètre 4µm présentes dans la « fumée faible ». Le même résultat est obtenu pour les particules de diamètre 2.5µm.

Pour les particules de diamètre 1µm, la concentration moyenne de crête sur la fumée faible ambiante n'a pu être déterminée ce qui empêche la comparaison des résultats. Elle est cependant de 31 mg/m^3 en présence de la cagoule ce qui est une concentration plus élevée que pour les autres diamètres de particules. Considérant que les particules de tailles supérieures parviennent à traverser aisément la cagoule, il faut s'attendre à ce qu'il en soit de même pour les plus petites.

Quantités totales de particules fines :

Par ailleurs, il est fait la moyenne des quantités totales de particules fines aspirées en une minute, selon les modalités testées. Les résultats sont représentés graphiquement ci-après.

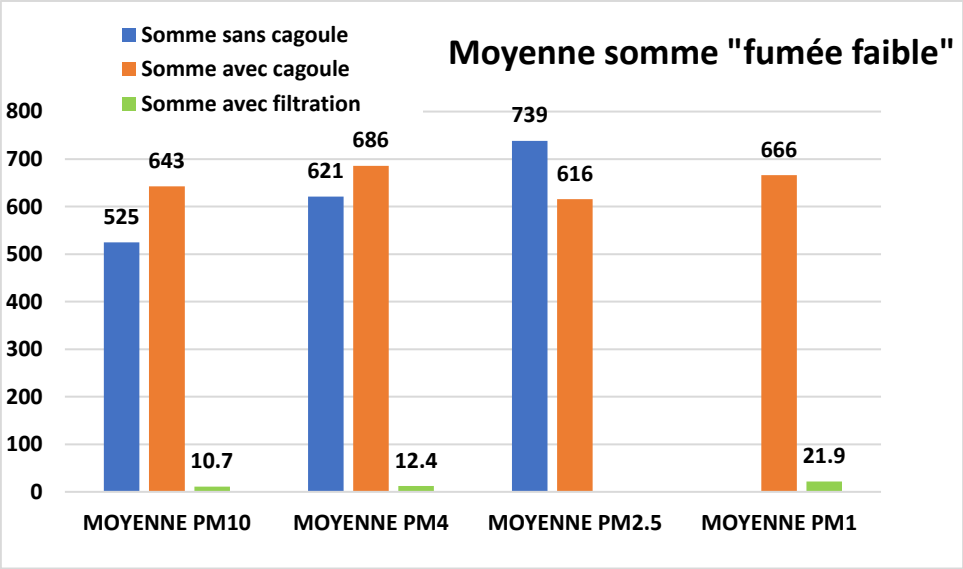


Fig.59 : Comparaison des moyennes de la quantité de particules aspirée en fonction du diamètre et la modalité testée dans les conditions de « fumée faible »

La quantité moyenne de particules fines aspirée, bien que variable selon le diamètre considéré, reste globalement équivalente avec et sans cagoule. Le calcul de la moyenne globale, tous diamètres de particules confondus, donne **628 mg/m^3** en absence de cagoule contre **653 mg/m^3** avec la cagoule, ce qui est du même ordre de grandeur. Au contraire, le dispositif filtrant les particules fines permet de diminuer considérablement la quantité totale de particules aspirées avec une moyenne globale tous diamètres confondus de **15 mg/m^3**, soit une baisse d'environ 95%.

3-1-4 Résultats en présence d'une « fumée modérée »

Les prélèvements réalisés dans une atmosphère de « fumée modérée » sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Fumées modérée	SANS CAGOULE		AVEC CAGOULE		AVEC DISPOSITIF FILTRANT	
	Moyenne crête	Somme	Moyenne crête	Somme	Moyenne crête	Somme
MOYENNE PM10	36	1264	41	1347	0.4	10.7
MOYENNE PM4	53	1640	45	1562	0.5	12.4
MOYENNE PM2.5	-	-	54	1326	-	-
MOYENNE PM1	29	1197	27	1057	1.6	21.9
Moyenne globale	***46***	***1367***	***42***	***1316***	***0.8***	***15***

Tableau 32 : Résultats moyennés pour chaque diamètre de particules et chaque modalité en conditions de « fumée modérée »

Concentrations moyennes des valeurs de crête :

Les concentrations moyennes des valeurs de crête obtenues en condition de « fumée modérée » sont représentées graphiquement ci-dessous.

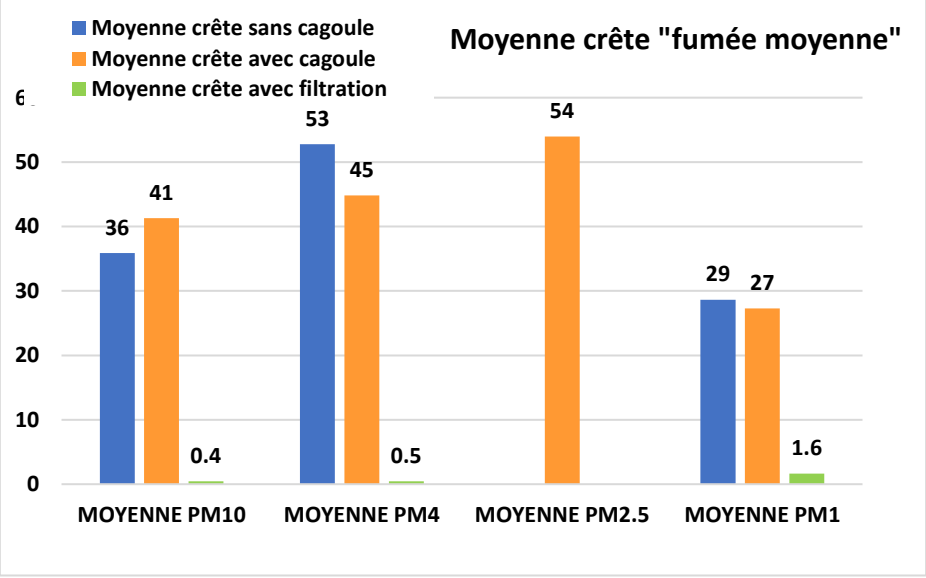


Fig.60 : Comparaison des moyennes de valeurs de crête selon le diamètre de particules fines et la modalité testée dans les conditions de « fumée modérée »

Les concentrations moyennes en particules fines obtenues à partir des valeurs de crête en condition de « fumée modérée » sont supérieures à celles obtenues dans le cas d'une « fumée faible ».

La fumée modérée contient en moyenne **36 mg/m³** de PM10 contre **41 mg/m³** après aspiration au travers de la cagoule, soit un écart non significatif de 5 mg/m³. Pour les PM4, la concentration ambiante est de **53 mg/m³** contre **45 mg/m³** en présence de la cagoule. Compte tenu des écarts types associés, cet écart de 8mg/m³ n'est pas significatif d'une quelconque variation. Par ailleurs, la concentration moyenne de PM2.5 n'a pu être mesurée sur la fumée ambiante. Enfin pour les PM1, les concentrations de **29 et 27 mg/m³** retrouvées respectivement avec et sans la cagoule sont également équivalentes. Il est donc à nouveau possible de conclure que la cagoule laisse totalement passer l'ensemble des particules fines présentes dans la fumée ambiante de type modéré.

En revanche, le dispositif filtrant assure une réduction de 95 à 99% des particules fines après aspiration.

Quantités totales de particules fines :

Dans la fumée modérée, la quantité totale de particules fines mesurée pour chaque diamètre pendant 1 minute est très proche en présence ou en absence de cagoule. Le graphique ci-dessous présente les résultats obtenus.

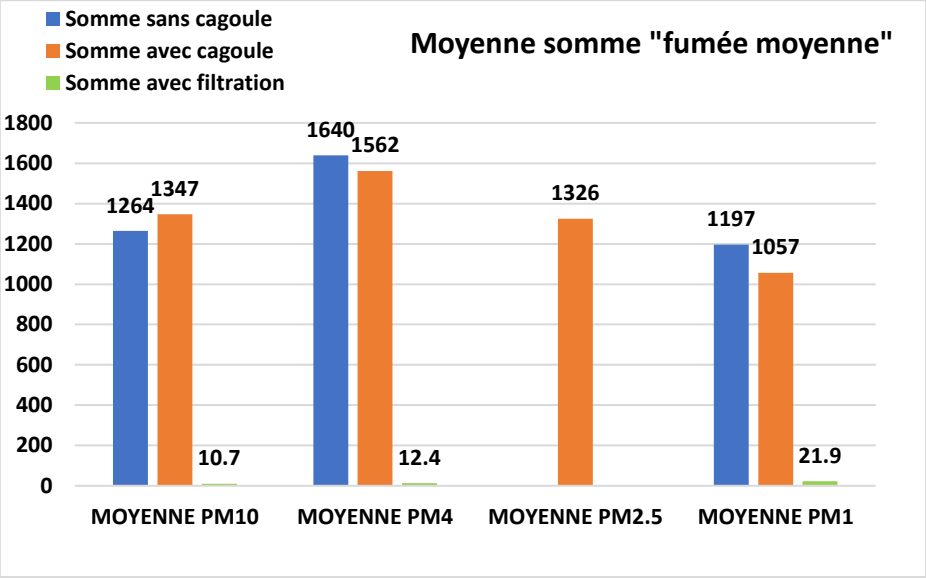


Fig.61 : Comparaison des quantités moyennes de particules aspirées selon la taille et la modalité testée dans les conditions de « fumée modérée »

Toutes tailles de particules confondues, ces quantités sont respectivement de **1367 mg/m³** sans cagoule, contre **1323 mg/m³** en présence de la cagoule.

Récapitulatif :

Ces résultats obtenus sur le terrain montrent d'une part que la variabilité des mesures est plus importante que celle obtenue à l'échelle du laboratoire. D'autre part, il apparaît que la présence de cagoule comme élément placé devant l'aspiration, ne permet pas de filtrer les particules fines quel que soit le diamètre étudié, au contraire de l'élément filtrant qui intercepte plus de 95% des particules fines toutes tailles confondues.

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs obtenues toutes tailles de particules confondues, vis-à-vis des concentrations moyennes et des quantités totales aspirées.

PARTICULES TOUTES TAILLES CONFONDUES	FUMEE FAIBLE	FUMEE MODEREE
Concentration moyenne crête mg/m^3 sans cagoule	22 à 24	36 à 53
Concentration moyenne crête mg/m^3 avec cagoule	21 à 31	27 à 54
Quantité totale mg/m^3 sur 1 min sans cagoule	628	1367
Quantité totale mg/m^3 sur 1 min avec cagoule	653	1323
Quantité totale mg/m^3 sur 1 min avec dispositif filtrant	15	22

Tableau 33 : Récapitulatif des mesures de particules fines sur brûlage dirigé, avec et sans cagoule

Conclusion :

Les prélèvements obtenus dans les conditions réelles d'un brûlage dirigé, confirment à l'instar des essais en laboratoire que la cagoule de protection utilisée par les personnels ne permet pas de filtrer les particules fines de 1 à 10 µm de diamètre, contenues dans les fumées de combustion issus de feux de végétation.

3-2 Exposition aux composés chimiques contenus dans les fumées

La composition chimique des fumées prélevées par la méthode d'adsorption sur tube Tenax, est analysée par GC-MS 48h après retour au laboratoire. Au total, 9 prélèvements sont effectués en faisant varier la densité de la fumée et les modalités d'aspiration. Ainsi, trois conditions ambiantes sont choisies : fumée faible, modérée et dense ; ainsi que trois modalités : absence de cagoule, avec cagoule puis avec élément filtrant les particules fines.

3-2-1 Analyse des composés chimiques contenus dans la « fumée faible »

3-2-1-1 Composition de la « fumée faible » en absence de cagoule

L'analyse du prélèvement sur tube Tenax réalisé dans une ambiance faiblement enfumée permet d'identifier 52 molécules différentes dont une seule se trouve à un seuil majoritaire : le toluène, (Cf Tableau 14, p 32 pour la définition des seuils). 3 autres molécules sont identifiées avec un seuil modéré, il s'agit du pentane, du propane-2-Ethoxy-2-méthyl et du P-xylène. Reste enfin 48 composés, qui sont retrouvés avec un seuil minoritaire. Le tableau ci-dessous en dresse la liste précise.

ECH N°1 : FUMEES FAIBLES SANS CAGOULE				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.37	BUTANE, 2-METHYL-	72	C5H12	78-78-4
1.43	PENTANE	72	C5H12	109-66-0
1.68	**PENTANE, 2-METHYL-**	86	C6H14	107-83-5
1.76	PENTANE, 3-METHYL-	86	C6H14	96-14-0
1.85	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
2.03	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.11	CYCLOPENTANE, METHYL-	84	C6H12	96-37-7
2.34	CYCLOPENTENE, 1-METHYL-	82	C6H10	693-89-0
2.47	**HEXANE, 2-METHYL-**	100	C7H16	591-76-4
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.80	PENTANE, 3-ETHYL-2,2-DIMETHYL	128	C9H20	16747-32-3
3.03	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.56	CYCLOHEXANE, METHYL	98	C7H14	108-87-2
3.71	HEXANE, 2,4-DIMETHYL	114	C8H18	589-43-5
3.82	CYCLOPENTANE, ETHYL	98	C7H14	1640-89-7
3.95	PENTANE, 3-ETHYL-2-METHYL-	114	C8H18	609-26-7
4.20	1-BUTANOL, 2-ETHYL	102	C6H14O	97-95-0
4.37	OCTANE, 4-METHYL	128	C9H20	2216-34-4
4.54	HEPTANE, 4-METHYL	114	C8H18	589-53-7
4.80	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.03	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
6.25	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.24	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4
10.71	OCTANE, 4-METHYL	128	C9H20	2216-34-4
10.88	OCTANE, 2-METHYL-	128	C9H20	3221-61-2
11.06	BENZENE, 1,4-DIMETHYL P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.19	O-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
11.44	CYCLOHEXANE, 1-ETHYL-4-METHYL-	126	C9H18	3728-56-1
12.61	BENZENE, 1,3-DIMETHYL- M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
12.94	**OCTANE, 3-METHYL-**	128	C9H20	2216-33-3
14.06	NONANE	128	C9H20	111-84-2
17.01	NONANE, 3-METHYL-	142	C10H22	06/04/5911
17.42	HEPTANE, 2,3,6-TRIMETHYL-	142	C10H22	4032-93-3
18.43	BENZENE, PROPYL	120	C9H12	103-65-1
19.13	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL	120	C9H12	611-14-3
19.36	BENZENE, (1-METHYLETHYL)-	120	C9H12	98-82-8
19.51	NONANE, 4-METHYL	142	C10H22	17301-94-9
19.87	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL	120	C9H12	108-67-8
20.36	OCTANE, 2,6-DIMETHYL-	142	C10H22	2051-30-1
20.54	HEPTANE, 2,3,4-TRIMETHYL	142	C10H22	52896-95-4
21.92	**BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL**	120	C9H12	95-63-6

22.97	DECANE	142	C10H22	124-18-5
24.13	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
24.78	CITRONELLYL PROPIONATE 6-OCTEN-1-OL,	212	C13H24O2	141-14-0
26.88	DECANE, 4-METHYL-	156	C11H24	2847-72-5
27.71	DECANE, 5-METHYL-	156	C11H24	13151-35-4
28.02	OCTANE, 3,3-DIMETHYL-	142	C10H22	4110-44-5
28.40	DECANE, 2-METHYL-	156	C11H24	6975-98-0
28.86	DECANE, 3-METHYL-	156	C11H24	13151-34-3
31.30	UNDECANE	156	C11H24	1120-21-4
39.03	DODECANE	170	C12H26	112-40-3
39.93	DECANE, 2,5,9-TRIMETHYL-	184	C13H28	62108-22-9

Tableau 34 : Composition de la « fumée faible » en absence de cagoule

La plupart des composés identifiés provient à la fois des hydrocarbures servant à l'allumage des torches mais aussi de la combustion des genêts. C'est le cas des alcanes linéaires, ramifiés et cycliques qui composent 75% du mélange gazeux, ainsi que des composés cycliques aromatiques dérivés du benzène et des terpènes, représentés à hauteur de 23%. Les effectifs par classe de famille chimique sont donnés ci-dessous.

FAMILLE DE PRODUITS CHIMIQUES	EFFECTIFS DANS LES PRELEVEMENTS FUMEE FAIBLE
Hydrocarbures linéaires, ramifiés et cycliques	**39**
Composés cycliques aromatiques et terpènes	12
Alcools linéaires, ramifiés et cycliques	1

Tableau 35 : Effectifs des composés classés par familles chimiques dans la fumée faible

3-2-1-2 Composition de la « fumée faible » avec cagoule

Le prélèvement de fumées réalisé au travers de la cagoule maintenue en double couche, permet d'identifier 41 composés chimiques distincts dont 33 (soit 80%) sont identiques à ceux retrouvés dans la fumée d'origine. Par ailleurs, deux nouveaux composés sont identifiés à un seuil minoritaire : il s'agit du 1-octène et de l'hexane,3-ethly-2,5-diméthyl. La liste des molécules retrouvée est donnée ci-après.

ECH N°2 : FUMEES FAIBLES AVEC CAGOULE				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.37	**BUTANE, 2-METHYL-**	72	C5H12	78-78-4
1.43	PENTANE	72	C5H12	109-66-0
1.68	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.76	PENTANE, 3-METHYL-	86	C6H14	96-14-0
1.85	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
2.03	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.34	CYCLOPENTENE, 1-METHYL-	82	C6H10	693-89-0
2.47	HEXANE, 2-METHYL-	100	C7H16	591-76-4
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.80	PENTANE, 3-ETHYL-2,2-DIMETHYL	128	C9H20	16747-32-3

3.03	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.56	CYCLOHEXANE, METHYL	98	C7H14	108-87-2
3.71	HEXANE, 2,4-DIMETHYL	114	C8H18	589-43-5
4.20	1-BUTANOL, 2-ETHYL	102	C6H14O	97-95-0
4.80	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.03	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.81	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.25	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.24	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4
10.71	OCTANE, 4-METHYL	128	C9H20	2216-34-4
10.88	OCTANE, 2-METHYL-	128	C9H20	3221-61-2
11.06	BENZENE, 1,4-DIMETHYL P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.19	O-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
12.94	OCTANE, 3-METHYL-	128	C9H20	2216-33-3
14.06	NONANE	128	C9H20	111-84-2
17.01	NONANE, 3-METHYL-	142	C10H22	06-04-5911
19.13	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL	120	C9H12	611-14-3
19.36	BENZENE, (1-METHYLETHYL)-	120	C9H12	98-82-8
19.51	NONANE, 4-METHYL	142	C10H22	17301-94-9
19.87	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL	120	C9H12	108-67-8
20.36	OCTANE, 2,6-DIMETHYL-	142	C10H22	2051-30-1
20.54	HEPTANE, 2,3,4-TRIMETHYL	142	C10H22	52896-95-4
21.5	HEXANE, 3-ETHYL-2,5-DIMETHYL-	142	C10H22	52897-04-8
21.92	BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL	120	C9H12	95-63-6
22.97	DECANE	142	C10H22	124-18-5
24.13	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
24.78	CITRONELLYL PROPIONATE 6-OCTEN-1-OL,	212	C13H24O2	141-14-0
26.88	DECANE, 4-METHYL-	156	C11H24	2847-72-5
27.71	DECANE, 5-METHYL-	156	C11H24	13151-35-4
28.02	OCTANE, 3,3-DIMETHYL-	142	C10H22	4110-44-5
28.86	DECANE, 3-METHYL-	156	C11H24	13151-34-3
31.30	UNDECANE	156	C11H24	1120-21-4
39.03	DODECANE	170	C12H26	112-40-3
39.93	DECANE, 2,5,9-TRIMETHYL-	184	C13H28	62108-22-9

Tableau 36 : Composition de la « fumée faible » en présence de cagoule

3-2-1-3 Composition de la « fumée faible » avec dispositif filtrant les particules fines

Le prélèvement d'une « fumée faible » au travers du dispositif filtrant les particules fines, renferme 44 composés chimiques, dont 85% sont issus de la fumée ambiante. Ces composés se trouvent tous à un seuil d'intensité minoritaire. La liste précise est fournie ci-dessous.

ECH N°3 : FUMEES FAIBLES AVEC DISPOSITIF FILTRANT LES PARTICULES				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.37	BUTANE, 2-METHYL-	72	C5H12	78-78-4
1.43	**PENTANE**	72	C5H12	109-66-0
1.68	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.76	PENTANE, 3-METHYL-	86	C6H14	96-14-0
1.85	HEXANE	86	C6H14	110-54-3

2.03	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.34	CYCLOPENTENE, 1-METHYL-	82	C6H10	693-89-0
2.47	**HEXANE, 2-METHYL-**	100	C7H16	591-76-4
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.80	PENTANE, 3-ETHYL-2,2-DIMETHYL	128	C9H20	16747-32-3
3.03	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.56	CYCLOHEXANE, METHYL	98	C7H14	108-87-2
3.71	HEXANE, 2,4-DIMETHYL	114	C8H18	589-43-5
4.20	1-BUTANOL, 2-ETHYL	102	C6H14O	97-95-0
4.80	**TOLUENE**	92	C7H8	108-88-3
5.03	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
6.25	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.24	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4
10.71	OCTANE, 4-METHYL	128	C9H20	2216-34-4
10.88	OCTANE, 2-METHYL-	128	C9H20	3221-61-2
11.06	**BENZENE, 1,4-DIMETHYL P-XYLENE**	106	C8H10	106-42-3
11.19	O-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
11.44	CYCLOHEXANE, 1-ETHYL-4-METHYL-	126	C9H18	3728-56-1
12.61	BENZENE, 1,3-DIMETHYL- M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
12.94	**OCTANE, 3-METHYL-**	128	C9H20	2216-33-3
14.06	NONANE	128	C9H20	111-84-2
19.13	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL	120	C9H12	611-14-3
19.36	BENZENE, (1-METHYLETHYL)-	120	C9H12	98-82-8
19.51	NONANE, 4-METHYL	142	C10H22	17301-94-9
19.87	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL	120	C9H12	108-67-8
20.36	OCTANE, 2,6-DIMETHYL-	142	C10H22	2051-30-1
20.54	HEPTANE, 2,3,4-TRIMETHYL	142	C10H22	52896-95-4
21.92	**BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL**	120	C9H12	95-63-6
22.97	DECANE	142	C10H22	124-18-5
24.13	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
24.78	CITRONELLYL PROPIONATE 6-OCTEN-1-OL,	212	C13H24O2	141-14-0
26.88	DECANE, 4-METHYL-	156	C11H24	2847-72-5
27.71	DECANE, 5-METHYL-	156	C11H24	13151-35-4
28.02	OCTANE, 3,3-DIMETHYL-	142	C10H22	4110-44-5
28.86	DECANE, 3-METHYL-	156	C11H24	13151-34-3
31.30	UNDECANE	156	C11H24	1120-21-4
39.03	DODECANE	170	C12H26	112-40-3
39.93	DECANE, 2,5,9-TRIMETHYL-	184	C13H28	62108-22-9

Tableau 37 : Composition de la « fumée faible » en présence du dispositif filtrant les particules fines

Résultats récapitulatifs des prélèvements sur « fumée faible » :

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus pour chaque cas étudié.

Prélèvements gazeux	Fumée faible en ambiante	Avec cagoule	Avec dispositif filtrant les particules fines
Nombre total de molécules	52	41	44
% de molécules identiques par rapport à la « fumée faible »	-	80	85
Nombre de molécules au « seuil majoritaire »	1	0	0
Nombre de molécules au « seuil modéré »	3	3	0
Nombre de molécules au « seuil minoritaire »	48	38	44

Tableau 38 : Récapitulatif des analyses GC-MS réalisées en présence d'une « fumée faible »

Le nombre de composés identifiés diminue lorsque l'aspiration des fumées s'effectue au travers de la cagoule ou du dispositif filtrant. Ce résultat s'explique très probablement par une baisse du volume effectivement pompé lors du prélèvement manuel.

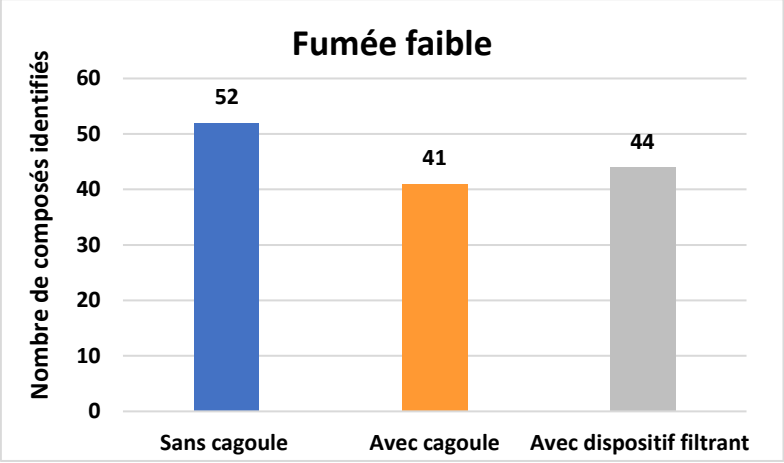


Fig. 62 : Nombre de composés identifiés dans la « fumée faible »

Cette baisse s'accompagne également d'une diminution de l'intensité des pics avec disparition du pic majoritaire au profit des pics modérés et minoritaires.

Ces résultats montrent également que 80 à 85% des composés chimiques contenus dans la fumée de faible densité parviennent à traverser la cagoule ainsi que le dispositif filtrant les particules fines.

3-2-2 Analyse des composés chimiques contenus dans la « fumée modérée »

3-2-2-1 Composition de la « fumée modérée » en absence de cagoule

L'analyse des composés gazeux contenus dans la « fumée modérée » permet d'identifier 56 molécules distinctes, soit un gain de 4 molécules supplémentaire par rapport à une fumée de faible densité. Avec une composition globalement comparable aux prélèvements précédents, la fumée présente cependant de nouveaux composés de type alcènes, ainsi qu'un acide, un alcool et un aldéhyde. La liste des composés est détaillée ci-dessous.

ECH N°4 FUMEES MODEREE SANS CAGOULE				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.25	1,3-BUTADIENE	54	C4H6	106-99-0
1.41	BUTANE	58	C4H10	106-97-8
1.51	1,1-DICYANOETHANE	80	C4H4N2	3696-36-4
1.55	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.67	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.79	1-PENTENE, 2-METHYL-	84	C6H12	763-29-1
2.02	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.21	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.25	1,3-CYCLOPENTADIENE, 1-METHYL-	80	C6H8	96-39-9
2.45	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.62	**HEXANE, 3-METHYL-**	100	C7H16	589-34-4
2.71	CYCLOHEXENE	82	C6H10	110-83-8
2.78	HEPTANE, 2,5-DIMETHYL-	128	C9H20	2216-30-0
2.87	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.02	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.55	CYCLOHEXANE, METHYL-	98	C7H14	108-87-2
3.96	2-NONYNOIC ACID	154	C9H14O2	1846-70-4
4.17	1-PENTANOL, 2-METHYL-	102	C6H14O	105-30-6
4.44	PYRROLE	67	C4H5N	109-97-7
4.78	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.01	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.81	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.21	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.14	**ETHYLBENZENE**	106	C8H10	100-41-4
10.96	P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.08	O-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
11.67	PHENYLETHYNE	102	C8H6	536-74-3
12.84	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	622-79-7
13.20	CYCLOPROPANE, 1-HEXYL-2-METHYL-	140	C10H20	62238-09-9
13.95	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.92	NONANE, 3-METHYL-	142	C10H22	06-04-5911
18.31	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
19.02	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.27	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL-	120	C9H12	611-14-3

19.42	BENZALDEHYDE	106	C7H6O	100-52-7
19.77	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL-	120	C9H12	108-67-8
20.44	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
21.42	BENZONITRILE	103	C7H5N	100-47-0
21.83	**BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL-**	120	C9H12	95-63-6
22.12	1-DECENE	140	C10H20	872-05-9
22.88	DECANE	142	C10H22	124-18-5
24.72	DECANE, 4-METHYL-	156	C11H24	2847-72-5
25.03	INDANE	118	C9H10	496-11-7
25.85	INDENE	116	C9H8	95-13-6
29.83	4,7-METHANO-1H-INDENE, OCTAHYDRO-	136	C10H16	6004-38-2
30.54	1-UNDECENE	154	C11H22	821-95-4
31.22	UNDECANE	156	C11H24	1120-21-4
36.97	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3
38.95	DODECANE	170	C12H26	112-40-3
46.10	DODECANE, 3-METHYL-	184	C13H28	17312-57-1
48.68	PYRIDINE, 3-(1-METHYL-2-PYRROLIDINYL)-,	162	C10H14N2	54-11-5
51.31	TRIDECANE	184	C13H28	629-50-5
52.98	ACENAPHTHYLENE	152	C12H8	208-96-8
62.94	TETRADECANE	198	C14H30	629-59-4
64.22	4-CYCLOPROPYLCYCLOHEXENE	122	C9H14	80105-51-7

Tableau 39 : Composition de la « fumée modérée » en absence de cagoule

L'augmentation de la densité de la fumée ambiante se traduit également par un rehaussement des seuils d'identification. Ainsi, 3 composés sont détectés à un seuil majoritaire, 10 à un seuil modéré et 43 à un seuil minoritaire.

Les effectifs des produits retrouvés sont classés par type de famille chimique.

FAMILLE DE PRODUITS CHIMIQUES	EFFECTIFS DANS LES PRELEVEMENTS FUMEE MODERE
Composés cycliques aromatiques	**21**
Hydrocarbures linéaires ramifiés et cycliques	19
Alcènes linéaires et cycliques	13
Alcools linéaires, ramifiés et cycliques	1
Aldéhydes	1
Acides	1

Tableau 40 : Effectifs des composés classés par familles chimiques dans la fumée modérée

La fumée modérée renferme essentiellement des composés cycliques aromatiques et des hydrocarbures linéaires, ramifiés et cycliques. Les alcènes linéaires et cycliques sont également bien représentés.

3-2-2-2 Composition de la « fumée modérée » avec cagoule

Le prélèvement réalisé en présence de la cagoule dans une fumée modérée révèle la présence de 45 molécules distinctes dont 41, soit 91%, sont identiques à celles retrouvées dans la fumée ambiante. Trois composés nouveaux sont identifiés : une amine avec 4 atomes de carbone, l'hexane et un aldéhyde : le butanal-2-ethyl. Le tableau ci-dessous en dresse la liste détaillée.

ECH N°5 FUMEES MODEREE AVEC CAGOULE				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.21	(2-AZIRIDINYLETHYL) AMINE		C4H10N2	4025-37-0
1.25	**1,3-BUTADIENE**	54	C4H6	106-99-0
1.41	BUTANE	58	C4H10	106-97-8
1.55	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.67	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.79	**1-PENTENE, 2-METHYL-**	84	C6H12	763-29-1
1.84	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
1.89	BUTANAL, 2-ETHYL-	100	C6H12O	97-96-1
2.02	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.21	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.25	1,3-CYCLOPENTADIENE, 1-METHYL-	80	C6H8	96-39-9
2.45	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.71	CYCLOHEXENE	82	C6H10	110-83-8
2.78	HEPTANE, 2,5-DIMETHYL-	128	C9H20	2216-30-0
2.87	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.02	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.55	CYCLOHEXANE, METHYL-	98	C7H14	108-87-2
4.78	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.01	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.81	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.21	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.14	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4
10.96	P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.08	O-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
12.84	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	622-79-7
13.20	CYCLOPROPANE, 1-HEXYL-2-METHYL-	140	C10H20	62238-09-9
13.95	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.92	NONANE, 3-METHYL-	142	C10H22	06-04-5911
18.31	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
19.02	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.27	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL-	120	C9H12	611-14-3
19.42	BENZALDEHYDE	106	C7H6O	100-52-7
19.77	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL-	120	C9H12	108-67-8
20.44	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
21.83	BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL-	120	C9H12	95-63-6
22.12	1-DECENE	140	C10H20	872-05-9
22.88	DECANE	142	C10H22	124-18-5
24.72	DECANE, 4-METHYL-	156	C11H24	2847-72-5

25.85	INDENE	116	C9H8	95-13-6
29.83	4,7-METHANO-1H-INDENE, OCTAHYDRO-	136	C10H16	6004-38-2
31.22	UNDECANE	156	C11H24	1120-21-4
36.97	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3
38.95	DODECANE	170	C12H26	112-40-3
46.10	DODECANE, 3-METHYL-	184	C13H28	17312-57-1

Tableau 41 : Composition de la « fumée modérée en présence de la cagoule

Par ailleurs, l'intensité des pics est atténuée : seuls 4 molécules se trouvent en catégorie « modérée », le reste des produits restant minoritaires.

3-2-2-3 Composition de la « fumée modérée » avec dispositif filtrant

Le prélèvement de fumée en condition modérée et en présence du dispositif filtrant renferme 35 composés qui sont tous présents initialement dans la fumée ambiante. Le tableau ci-dessous en dresse la liste détaillée.

ECH N°6 FUMEES MODEREE AVEC DISPOSITIF FILTRANT				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.25	**1,3-BUTADIENE**	54	C4H6	106-99-0
1.41	BUTANE	58	C4H10	106-97-8
1.55	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.67	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.79	**1-PENTENE, 2-METHYL-**	84	C6H12	763-29-1
2.02	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.21	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.25	1,3-CYCLOPENTADIENE, 1-METHYL-	80	C6H8	96-39-9
2.45	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.78	HEPTANE, 2,5-DIMETHYL-	128	C9H20	2216-30-0
2.87	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.02	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.55	CYCLOHEXANE, METHYL-	98	C7H14	108-87-2
4.78	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.01	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.81	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.21	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.14	ETHYLBENZENE	106	C8H10	100-41-4
10.96	P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.08	O-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
12.84	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	622-79-7
13.20	CYCLOPROPANE, 1-HEXYL-2-METHYL-	140	C10H20	62238-09-9
13.95	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.92	NONANE, 3-METHYL-	142	C10H22	06-04-5911
18.31	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
19.02	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.27	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL-	120	C9H12	611-14-3

19.42	BENZALDEHYDE	106	C7H6O	100-52-7
19.77	BENZENE, 1,3,5-TRIMETHYL-	120	C9H12	108-67-8
20.44	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
21.83	BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL-	120	C9H12	95-63-6
22.88	DECANE	142	C10H22	124-18-5
24.72	DECANE, 4-METHYL-	156	C11H24	2847-72-5
31.22	UNDECANE	156	C11H24	1120-21-4

Tableau 42 : Composition de la « fumée modérée en présence du dispositif filtrant

21 molécules contenues initialement dans la fumée sont passées en dessous du seuil de détection et seuls 3 produits sont maintenus au seuil modéré.

Résultats récapitulatifs des prélèvements sur « fumée modérée » :

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus en présence d'une fumée de densité modérée :

Prélèvements gazeux	Fumée modérée en ambiante	Avec cagoule	Avec dispositif filtrant les particules fines
% de molécules identiques par rapport à la « fumée faible »	-	91	100
Nombre total de molécules	56	45	35
Nombre de molécules au « seuil majoritaires »	3	0	0
Nombre de molécules au « seuil modéré »	10	4	3
Nombre de molécules au « seuil minoritaire »	42	39	32

Tableau 43 : Récapitulatif des analyses GC-MS réalisées en présence d'une « fumée modérée »

Le nombre total de composés identifiés augmente lorsque la fumée présente une densité modérée. Le fait d'utiliser une cagoule ou un dispositif filtrant conduit à nouveau à une diminution de ce nombre qui s'accompagne d'une baisse d'intensité des pics.

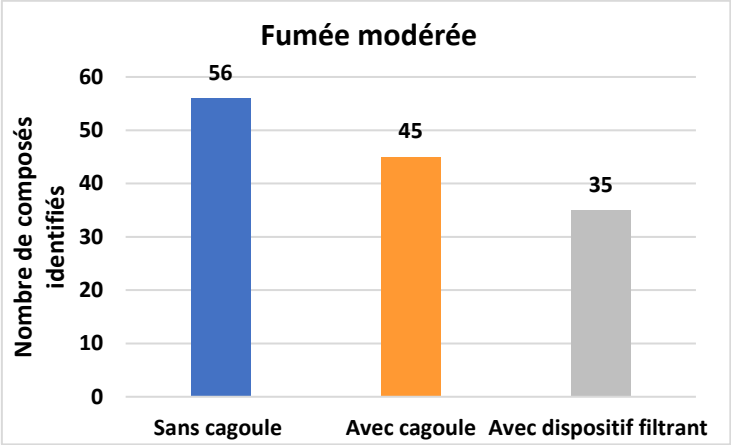


Fig. 63 : Nombre de composés identifiés dans la « fumée modérée »

Enfin, 91 à 100% des composés chimiques ayant traversés la cagoule ainsi que le dispositif filtrant les particules fines proviennent de la fumée initiale.

3-2-3 Analyse des composés chimiques contenus dans la « fumée dense »

3-2-3-1 Composition de la « fumée dense » en absence de cagoule

L'analyse d'une fumée dense permet d'identifier 66 composés, dont 41 sont nouveaux par rapport aux fumées précédentes. Il s'agit essentiellement de composés benzéniques. La liste globale est détaillée ci-dessous.

ECH N°7 FUMEES DENSES SANS CAGOULE				
Temps de rétention min	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.39	METHANE, TRICHLOROFLUORO	136	CCl3F	75-69-4
1.56	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.68	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.76	PENTANE, 3-METHYL-	86	C6H14	96-14-0
1.80	3-HEXENE, (E)-	84	C6H12	13269-52-8
1.86	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
2.04	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.11	CYCLOHEXANE	84	C6H12	110-82-7
2.47	BENZENE (CAS)	78	C6H6	71-43-2
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.80	HEPTANE, 2,3,6-TRIMETHYL-	142	C10H22	4032-93-3
2.89	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.03	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.57	CYCLOHEXANE, METHYL-	98	C7H14	108-87-2
3.72	BUTANE, 2,2,3-TRIMETHYL-	100	C7H16	464-06-2
4.20	PENTANE, 2,3,4-TRIMETHYL-	114	C8H18	565-75-3
4.39	PENTANE, 2,3,3-TRIMETHYL-	114	C8H18	560-21-4
4.59	HEXANE, 2,3-DIMETHYL-	114	C8H18	584-94-1
4.81	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.04	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.84	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0

6.25	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
7.41	OCTANE, 4-METHYL-	128	C9H20	2216-34-4
8.87	CHLOROBENZENE-D5	117	C6ClD5	3114-55-4
10.20	**ETHYLBENZENE**	106	C8H10	100-41-4
11.02	P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.15	**O-XYLENE**	106	C8H10	95-47-6
11.41	OCTANE, 3-METHYL-	128	C9H20	2216-33-3
12.9	M-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
14.03	NONANE	128	C9H20	111-84-2
15.20	2-DECEN-1-OL	156	C10H20O	22104-80-9
15.73	BENZENE, (1-METHYLETHYL)-	120	C9H12	98-82-8
16.32	CYCLOHEXANE, (1-METHYLETHYL)-	126	C9H18	696-29-7
16.98	OCTANE, 2-BROMO-	192	C8H17Br	557-35-7
17.37	HEPTANE, 2,3,6-TRIMETHYL-	142	C10H22	4032-93-3
18.36	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
19.1	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.33	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
19.84	BENZENE, 1,2,3-TRIMETHYL-	120	C9H12	526-73-8
20.50	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL-	120	C9H12	611-14-3
21.25	1H-INDENE, OCTAHYDRO-, CIS-	124	C9H16	4551-51-3
21.95	BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL	120	C9H12	95-63-6
22.93	DECANE (CAS)	142	C10H22	124-18-5
23.06	BENZENE, (2-METHYLPROPYL)-	134	C10H14	538-93-2
23.20	BENZENEACETALDEHYDE, .ALPHA.-METHYL-	134	C9H10O	93-53-8
24.08	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
24.28	BENZENE, METHYL(1-METHYLETHYL)-	134	C10H14	25155-15-1
25.08	INDANE	118	C9H10	496-11-7
25.29	DECANE, 2,3,8-TRIMETHYL	184	C13H28	62238-14-6
25.72	DECANE, 2,5,9-TRIMETHYL	184	C13H28	62108-22-9
25.94	BENZENE, 1-PROPYNYL-	116	C9H8	673-32-5
25.65	BENZENE, 1,2-DIETHYL	134	C10H14	135-01-3
26.84	BENZENE, 1-METHYL-3-PROPYL-	134	C10H14	1074-43-7
27.39	BENZENE, 4-ETHYL-1,2-DIMETHYL	134	C10H14	934-80-5
27.77	4,7-METHANO-1H-INDENE, 2,3,3A,4,7,7A-HEX	134	C10H14	19398-83-5
27.9	BENZENE, 1-METHYL-4-PROPYL-	134	C10H14	1074-55-1
28.08	PENTANE, 2,2,3,4-TETRAMETHYL-	128	C9H20	1186-53-4
29.01	BENZENE, 1-ETHYL-2,4-DIMETHYL-	134	C10H14	874-41-9
29.86	4,7-METHANO-1H-INDENE, OCTAHYDRO-	136	C10H16	6004-38-2
30.94	BENZENE, 2-ETHYL-1,4-DIMETHYL-	134	C10H14	1758-88-9
31.99	BENZENE, 1,2,3,4-TETRAMETHYL	134	C10H14	488-23-3
32.24	BENZENE, 1,2,4,5-TETRAMETHYL-	134	C10H14	95-93-2
33.58	TRICYCLO[5.2.1.0(2,6)]DECANE, 4-METHYL-	150	C11H18	900150-03-4
33.69	INDAN, 1-METHYL-	132	C10H12	767-58-8
34.3	INDAN, 1-METHYL-	132	C10H12	767-58-8
34.58	BENZENE, 1-ETHYL-2,4-DIMETHYL-	134	C10H14	874-41-9
37.04	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3

Tableau 44 : Composition de la « fumée dense » en absence de cagoule

L'enrichissement du mélange gazeux se traduit également par une hausse générale de l'intensité des pics avec 11 molécules majoritaires et 6 classées modérées. Reste 49 composés détectés à un seuil minoritaire. Leur répartition par classe de famille chimique est présentée ci-dessous.

FAMILLE DE PRODUITS CHIMIQUES	EFFECTIFS DANS LES PRELEVEMENTS FUMEE DENSE
Composés cycliques aromatiques	**28**
Hydrocarbures linéaires et cycliques	**28**
Alcènes linéaires et cycliques	7
Composés halogénés	3
Alcools linéaires, ramifiés et cycliques	1

Tableau 45 : Effectifs des composés classés par familles chimiques dans la fumée dense

Les deux principales familles de composés représentées dans la fumée dense sont les composés cycliques aromatiques et les hydrocarbures linéaires ou cycliques. Quelques alcènes sont également identifiés ainsi que des composés contenant un halogène (Chlore et brome).

3-2-3-2 Composition de la « fumée dense » en présence de cagoule

En présence de la cagoule, la composition chimique des fumées est globalement identique avec 42 composés identifiés, dont 38 sont retrouvés dans la fumée ambiante, soit 90% de similitude. Le tableau ci-dessous en dresse la liste précise.

ECH N°8 FUMEES DENSES AVEC CAGOULE				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.42	PENTANE	72	C5H12	109-66-0
1.68	**PENTANE, 2-METHYL-**	86	C6H14	107-83-5
1.76	**PENTANE, 3-METHYL-**	86	C6H14	96-14-0
1.80	3-HEXENE, (E)-	84	C6H12	13269-52-8
1.86	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
2.04	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.11	CYCLOHEXANE	84	C6H12	110-82-7
2.47	BENZENE (CAS)	78	C6H6	71-43-2
2.62	HEXANE, 3-METHYL-	100	C7H16	589-34-4
2.80	HEPTANE, 2,3,6-TRIMETHYL-	142	C10H22	4032-93-3
2.89	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.03	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.57	CYCLOHEXANE, METHYL-	98	C7H14	108-87-2
3.72	BUTANE, 2,2,3-TRIMETHYL-	100	C7H16	464-06-2
4.20	PENTANE, 2,3,4-TRIMETHYL-	114	C8H18	565-75-3
4.59	HEXANE, 2,3-DIMETHYL-	114	C8H18	584-94-1
4.46	PYROLE	67	C4H5N	109-97-7
4.81	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.04	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.84	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.25	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.20	**ETHYLBENZENE**	106	C8H10	100-41-4
11.02	P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.15	**O-XYLENE**	106	C8H10	95-47-6
11.41	OCTANE, 3-METHYL-	128	C9H20	2216-33-3
11.72	PHENYLETHYNE	102	C8H6	536-74-3

12.9	M-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
14.03	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.32	CYCLOHEXANE, (1-METHYLETHYL)-	126	C9H18	696-29-7
16.98	OCTANE, 2-BROMO-	192	C8H17Br	557-35-7
18.36	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1
19.1	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.33	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
19.47	1-PROPANOL-2,2-DIMETHYL-BENZOATE	192	C12H16O2	3581-70-2
19.84	BENZENE, 1,2,3-TRIMETHYL-	120	C9H12	526-73-8
20.31	HEPTANE 2,5,5-TRIMETHYL	142	C10H22	1189-99-7
20.50	**BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL-**	120	C9H12	611-14-3
21.95	BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL	120	C9H12	95-63-6
22.93	DECANE (CAS)	142	C10H22	124-18-5
24.08	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
25.94	BENZENE, 1-PROPYNYL-	116	C9H8	673-32-5
37.04	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3

Tableau 46 : Composition de la « fumée dense » avec cagoule

2 composés, le benzène et le toluène restent majoritaires en intensité et 4 composés sont en intensité modérée. Les 36 autres composés sont devenus minoritaires.

3-2-3-3 Composition de la « fumée dense » en présence du dispositif filtrant

Les fumées denses prélevées en présence du dispositif filtrant renferment 34 composés dont 31, soit 91% sont retrouvés dans la fumée dense initiale.

ECH N°9 FUMEES DENSES AVEC DISPOSITIF FILTRANT				
Temps de rétention min	**Nom chimique du composé**	**Masse molaire**	**Formule brute**	**N° CAS**
1.42	PENTANE	72	C5H12	109-66-0
1.56	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.68	PENTANE, 2-METHYL-	86	C6H14	107-83-5
1.80	3-HEXENE, (E)-	84	C6H12	13269-52-8
1.86	HEXANE	86	C6H14	110-54-3
2.04	PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	102	C6H14O	637-92-3
2.47	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.89	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.03	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.57	CYCLOHEXANE, METHYL-	98	C7H14	108-87-2
4.39	PENTANE, 2,3,3-TRIMETHYL-	114	C8H18	560-21-4
4.81	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.04	HEPTANE, 3-METHYL-	114	C8H18	589-81-1
5.84	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0
6.25	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
10.20	**ETHYLBENZENE**	106	C8H10	100-41-4
11.02	P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.15	**O-XYLENE**	106	C8H10	95-47-6
12.9	M-XYLENE	106	C8H10	95-47-6
13.24	1-NONENE	126	C9H18	124-11-8
14.03	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.98	OCTANE, 2-BROMO-	192	C8H17Br	557-35-7
18.36	BENZENE, PROPYL-	120	C9H12	103-65-1

19.1	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
19.33	BENZENE, 1-ETHYL-4-METHYL-	120	C9H12	622-96-8
19.84	BENZENE, 1,2,3-TRIMETHYL-	120	C9H12	526-73-8
20.50	BENZENE, 1-ETHYL-2-METHYL-	120	C9H12	611-14-3
21.95	BENZENE, 1,2,4-TRIMETHYL	120	C9H12	95-63-6
22.93	DECANE (CAS)	142	C10H22	124-18-5
24.08	BENZENE, 1-ETHYL-3-METHYL-	120	C9H12	620-14-4
25.94	BENZENE, 1-PROPYNYL-	116	C9H8	673-32-5
31.26	UNDECANE	156	C1H24	1120-21-4
31.99	BENZENE, 1,2,3,4-TETRAMETHYL	134	C10H14	488-23-3
37.04	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3

Tableau 47 : Composition de la « fumée dense » avec dispositif filtrant

Le benzène reste en intensité majoritaire sur le prélèvement tandis que trois composés, le pentane, le toluène et le M-xylène présentent une intensité modérée. Les autres composés minoritaires sont au nombre de 30.

Résultats récapitulatifs des prélèvements sur « fumée dense » :

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus en présence d'une fumée dense :

Prélèvements gazeux	Fumée dense en ambiante	Avec cagoule	Avec dispositif filtrant les particules fines
Nombre total de molécules	66	42	34
% de molécules identiques par rapport à la « fumée faible »	-	90	91
Nombre de molécules au « seuil majoritaires »	11	2	1
Nombre de molécules au « seuil modéré »	6	4	3
Nombre de molécules au « seuil minoritaire »	49	36	30

Tableau 48 : Récapitulatif des analyses GC-MS réalisées en présence d'une « fumée dense »

Bien que le nombre de composés identifiés dans la fumée dense soit augmenté, les fumées aspirées au travers de la cagoule et du dispositif filtrant présentent un nombre de composés équivalent à ceux retrouvés lors des prélèvements précédents.

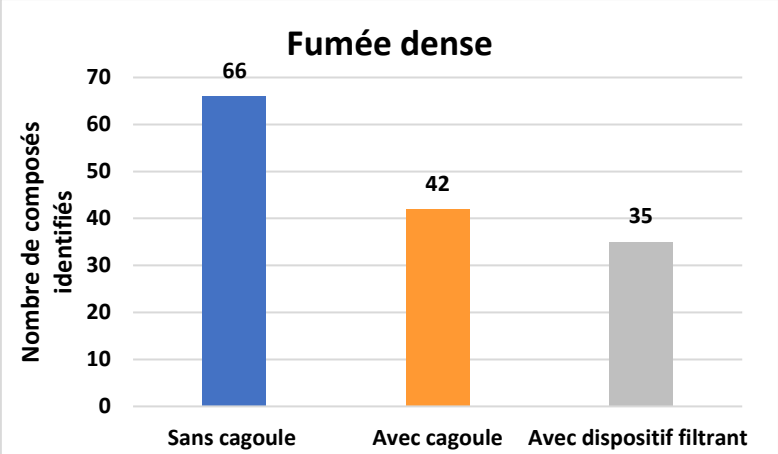


Fig. 64 : Nombre de composés identifiés dans la « fumée dense »

De plus, ceci provoque à nouveau une diminution générale de l'intensité des pics, avec disparition des pics majoritaires et modérés au profit des pics minoritaires.

Par ailleurs, la quasi-totalité des composés chimiques ayant traversé la cagoule ainsi que le dispositif filtrant les particules fines sont issus de la fumée ambiante.

Conclusions :

L'analyse GC-MS de la composition des fumées a permis d'identifier les différents composés chimiques provenant à la fois de la combustion des végétaux et des hydrocarbures utilisés pour l'allumage. Les principaux, à la fois par leur récurrence et leur prépondérance, sont au nombre de 13. Leur nom respectif et leur toxicité connue sont listés ci-dessous.

COMPOSE CHIMIQUE IDENTIFIE	INFORMATIONS CONNUES
PENTANE, 2-METHYL-	Hydrocarbure de la famille des alcanes, isomère de l'hexane.
HEXANE	Très toxique, puissantes propriétés neurotoxiques périphériques (polynévrite) et certainement centrales (maladie de Parkinson)
PROPANE, 2-ETHOXY-2-METHYL-	Possibilité d'atteinte de l'appareil reproducteur male, effet en attente de confirmation.
BENZENE	Classé **cancérogène avéré** pour l'homme (groupe 1) sur la base de leucémies observées dans des études épidémiologiques et animales.
HEXANE, 3-METHYL-	Produit irritant les muqueuses, provoquant une dépression du système nerveux central : maux de tête, étourdissements, somnolence, narcose. Ce produit peut causer une pneumonite chimique s'il est aspiré dans les poumons.
TOLUENE	Irritant pour la peau et les yeux. L'exposition répétée peut être à l'origine de signes neurologiques centraux : psychosyndrome organique, altération de l'audition et de la vision des couleurs. Des atteintes hépatiques et rénales ont également été rapportées. Données insuffisantes sur un effet cancérogène du toluène chez l'homme.
ETHYLBENZENE	Irritant pour la peau et les muqueuses, il peut entraîner une dépression du système nerveux central. Une atteinte hématologique et hépatique a plus rarement été également rapportée.

XYLENES	Irritants respiratoire, oculaire et cutanée. Provoque des troubles digestifs, dépression du système nerveux central, pneumopathie d'inhalation et effets neurologiques.
PHENYLETHYNE	Hydrocarbure alcynique pas d'effet connu
BENZENE, PROPYL-	Toxique pour la vie aquatique et l'environnement.
DERIVES BENZENIQUES MASSE MOLAIRE 120 C9H12	Hydrocarbures aromatiques provoquant une irritation de la peau et des muqueuses, des troubles neurologiques (somnolence, ébriété, céphalées, vertige, coma), trouble de la mémoire et du comportement qui traduit une atteinte neurologique progressive.
INDANE	Hydrocarbure bicyclique et aromatique, commun dans les goudrons pétrochimiques
NAPHTHALENE	Camphre de goudron, famille des HAP (hydrocarbure aromatique polycyclique), à odeur caractéristique qui provoque des symptômes digestifs. Peu entraîner des opacités du cristallin. Légèrement irritant pour la peau et l'œil.

Tableau 49 : Principaux composés chimiques retrouvés dans la fumée et toxicité connue

La fumée contient de l'hexane et du benzène qui sont deux composés très toxiques, le premier comme neurotoxique et le second comme cancérogène avéré. Elle renferme également de nombreuses molécules irritantes pour les poumons, les yeux et la peau, comme l'hexane3-méthyl, le toluène, les xylènes et les dérivés hydrocarbures aromatiques.

Elle contient également un produit qui atteint l'appareil reproducteur male : le propane, 2-ethoxy-2-methyl. Selon la dose et la fréquence d'exposition, ces effets peuvent d'avérer plus ou moins sévères.

La fumée contient également de nombreux autres composés dont les effets sur la santé ne sont pas connus. Le nombre de composés identifiés est illustré dans le graphe ci-dessous.

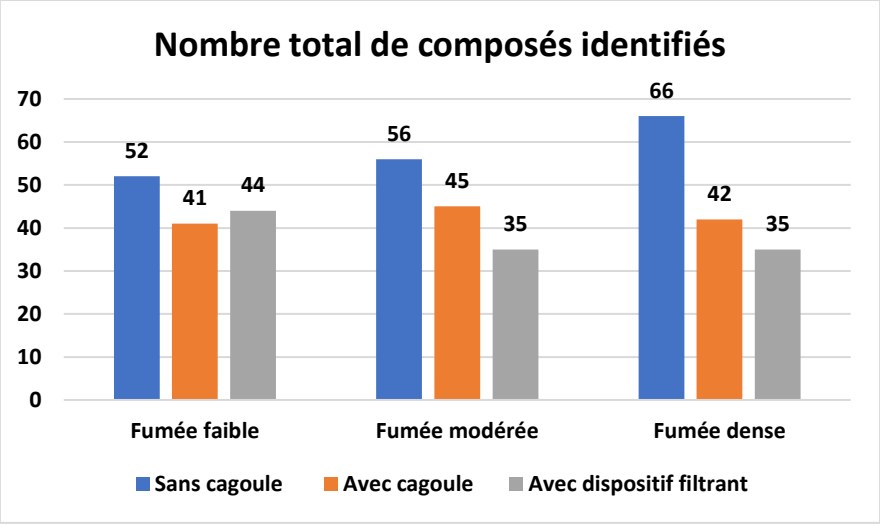


Fig. 65 : Variation du nombre de composés identifiés dans les différents types de fumée et modalités

Il s'avère que plus la densité de la fumée augmente, plus le nombre de produit et l'intensité des pics s'accroit. La présence de la cagoule ou du dispositif filtrant conduit à une légère baisse du volume de prélèvement qui se traduit par une diminution de l'intensité des pics.

En revanche, entre 80 et 100% des composés identifiés proviennent effectivement de la fumée ambiante et parviennent à traverser les textiles. Par conséquent, la cagoule utilisée sur les feux de forêts ne permet pas de filtrer les composés chimiques contenus dans la fumée. De même, le dispositif filtrant les particules fines est inopérant pour les retenir.

Ces résultats obtenus dans les conditions de brûlage dirigé confirment les mesures et observations réalisées en laboratoire.

2-3 Exposition au CO et au Formaldéhyde

Les dosages passifs du monoxyde de carbone et du formaldéhyde sont réalisés sur 6 personnes différentes qui opèrent autour du brûlage dirigé pendant une durée de 3 heures environ, avec un changement de poste au bout d'1h30.

- Formaldéhyde :

L'exposition au formaldéhyde est nulle pendant le brûlage car aucun tube passif ne présente de coloration spécifique après exposition, dans la gamme comprise entre 0.1 et 20 ppm.h. Le type de végétaux en combustion et la faible exposition peuvent expliquer ce résultat.

- Monoxyde de carbone :

Tous les personnels évoluant à proximité du brûlage sont exposés au monoxyde de carbone contenu dans les fumées. Le CO est dosé dans la gamme de 50 à 1000 ppm.h. Le tableau ci-dessous recapitule les résultats obtenus par opérateur.

Personnels	SEBASTIEN	BRUNO	DIDIER	HERVE	CLAUDE	AROLD
POSTES DE TRAVAIL	Cadre feu tactique + allumeur	Chef chantier + allumeur	Allumeur + sécurité	Allumeur + Chef de chantier	Prélèvement de fumée / images caméra	Sécurité + Allumeur
DOSE CO ppm.hr	CO ~ 25	25 < CO < 50	25 < CO < 50	CO ~ 50	CO = 50	CO ~ 60
Concentration moyenne ppm	**8.3**	**12.5**	**12.5**	**16.7**	**16.7**	**20.0**

Tableau 50 : Récapitulatif des dosages de CO sur tubes passifs

La lecture de la dose de CO sur le tube colorimétrique est donnée en ppm.h. Pour connaître la concentration moyenne de CO inhalé, cette valeur est divisée par la durée totale de l'exposition (estimée à 3h).

Lors de ce brûlage dirigé, la concentration moyenne de CO sur trois heures de travail est faible car comprise entre **8.3 et 20 ppm**. Avec 8.3 ppm, le poste de « cadre feu tactique » est moins exposé que les autres. Les postes d'allumeurs (ou portes torches) ainsi que les chefs de chantier sont exposés à des concentrations moyennes de **12.5 et 16.7 ppm**, soit environ le double. Le responsable sécurité qui suit les préleveurs au plus près du feu est davantage exposé avec une concentration moyenne de **20.0 ppm** sur 3 heures.

La règlementation du travail définit des valeurs maximales auxquelles les travailleurs peuvent être exposés sans risque. Une concentration de 25 ppm est considérée comme inoffensive pour un personnel exposé pendant 40 heures par semaine et tout au long de sa carrière.

La concentration de CO limite à ne jamais dépasser quelle que soit la durée d'exposition est de 200 ppm et une évacuation rapide s'impose à partir de 1500 ppm durant 30 min. Les symptômes qui surviennent à partir de 200 ppm sont parfois difficiles à identifier avec apparition de maux de tête, de vertige, de nausées et de fatigue pouvant passer inaperçu ou être attribués à d'autres causes.

Les niveaux d'exposition moyen relevés sur ce brûlage dirigé peuvent cependant cacher des épisodes d'expositions intenses mais brefs dans le temps, par exemple lors de la traversée d'un nuage de fumée. Pour connaître de telles concentrations, l'utilisation de détecteurs spécifiques de CO est à envisager.

4- CONCLUSION DEUXIEME PARTIE

A l'instar des essais en laboratoire, les expérimentions conduites sur brûlage dirigé confirment que la cagoule portée par les personnels en intervention sur les feux de végétation ne permet pas de filtrer les particules fines ni les composés chimiques contenus dans les fumées.

En effet, les particules fines dont le diamètre est compris entre 10 et 1 µm traversent le textile de la cagoule et sont inhalés directement dans les poumons, vers les alvéoles pulmonaires.

La cagoule laisse également passer les nombreux composés chimiques contenus dans les fumées et en particulier les composés toxiques et irritants, dont les effets sont dose-dépendants.

L'évolution des connaissances sur ce sujet est susceptible de faire progresser la prévention en matière de protection des personnels en agissant à la fois sur les bonnes pratiques de travail, le suivi des personnels et le développement d'innovations techniques pour réduire le risque d'exposition.