REPUBLIQUE FRANCAISE

VALABRE

CENTRE D'ESSAIS ET DE RECHERCHE

ETUDE PORTANT SUR L'EFFICACITE DE LA FILTRATION D'UN PROTOTYPE DE CAGOULE VIS-A-VIS DES FUMEES ISSUES DES FEUX DE VEGETATION ET DES PARTICULES FINES

PARTIE 1 :

TESTS DE FILTRATION EN LABORATOIRE

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	Avril-mai 2019

Auteur : Mme ARVIEU Pascale

Le présent rapport comporte 52 pages.

Visa de la Directrice du CEREN

Mme Frédérique GIROUD

Date : 03/06/2019

Sommaire

AVANT-PROPOS : LIMITE DE LA PORTEE CONTRACTUELLE DES TESTS **5**

PARTIE 1 : TESTS D'EFFICACITE EN LABORATOIRE D'UNE CAGOULE DE PROTECTION, VIS-A-VIS DE SES PERFORMANCES DE FILTRATION **6**

1- INTRODUCTION **6**

2- MATERIELS & MODALITES DE TESTS **6**

2-1 PRESENTATION DES PROTOTYPES DE CAGOULE ET DES ECHANTILLONS TEXTILES LIVRES POUR TESTS **6**

2-1-1 Prototype de cagoule N°1 ..... *6*

2-1-2 Prototype de cagoule N°2 ..... *8*

2-1-3 Echantillons de textiles circulaires *9*

2-2 MATERIELS DE MESURES **10**

2-2-1-Dosage des gaz toxiques par colorimétrie *10*

2-2-2 Dosage des particules fines et ultrafines dans les fumées *11*

2-2-3 Analyse des fumées par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse *13*

2-3 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX MIS EN ŒUVRE **15**

2-3-1 Générateur de fumée *15*

2-3-2 Dispositif de test actif sous aspiration *16*

2-3-3 Dispositif de test passif *17*

2-3-4 Test global sur support facial *18*

3- RESULTATS **19**

3-1 TESTS ACTIFS SOUS ASPIRATION **19**

3-1-1 Mesure des débits d'aspiration au niveau des échantillons en absence de fumée *19*

3-1-1-1 Débits d'air sous aspiration modérée 19

3-1-1-2 Débits d'aspiration en conditions d'effort 19

3-1-1-2 Débits d'aspiration en présence de fumée 20

3-1-2 Dosage des gaz toxiques *22*

3-1-2-1 Concentrations en acroléine 22

3-1-2-2 Concentrations en monoxyde de carbone CO 22

3-1-2-3 Concentrations en formaldéhyde 23

3-1-3 Dosages des particules fines et ultrafines *24*

3-1-3-1 Particules fines 24

3-1-3-2 Particules ultrafines 28

3-1-4 Analyse de la composition de la fumée par GC-MS *29*

3-1-4-1 Caractérisation de la fumée dans E1 29

3-1-4-2 Fumée dans E2 après aspiration au travers du textile beige monocouche 31

3-1-4-3 Fumée dans E2 après aspiration au travers de l'assemblage beige/gris 33

3-1-4-4 Fumée dans E2 après aspiration au travers du textile rouge 34

3-1-4-5 Fumée dans E2 après aspiration au travers de l'assemblage rouge/gris 35

3-1-4-6 Fumée dans E2 après aspiration au travers de l'assemblage rouge/filtre charbon 36

3-2 TESTS PASSIFS **39**

3-2-1 Résultats des textiles monocouches rouge et beige *39*
3-2-1-1 Particules fines 39
3-2-1-2 Particules ultrafines 40
3-2-2 Résultats des assemblages rouge/gris et beige/gris *40*
3-2-2-1 Particules fines 40
3-2-2-2 Particules ultrafines 41
3-3 TEST GLOBAL SUR SUPPORT FACIAL 44
3-3-1 Essai N°1- Test global *44*
3-3-2 Essai N°2- Test passif sur support facial *45*
3-3-3 Essai N°3 : Test actif sous aspiration *46*
4- CONCLUSIONS 50

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.

Partie 1 : Tests d'efficacité en laboratoire d'une cagoule de protection, vis-à-vis de ses performances de filtration

1- INTRODUCTION

Les particules fines de tailles comprises entre 1 et 10 µm pénètrent profondément dans les poumons jusqu'au niveau des alvéoles pulmonaires entraînant des risques sanitaires pour les personnels exposés. Il en va de même pour les particules ultrafines < 1µm (comme les 0.4µm) et les nombreux gaz et composés organiques volatils (COV) qui composent les fumées.

L'évaluation de l'efficacité de protection d'une cagoule vis-à-vis des particules fines et ultrafines, ainsi que des composés organiques volatils et des produits toxiques présents dans les fumées de végétation consiste à vérifier ses performances de filtration par des essais en laboratoire.

Les essais décrits ci-dessous sont réalisés au laboratoire du CEREN, sur le site de L'Entente Valabre, centre Francis Arrighi, RD7, 13120 GARDANNE.

2- MATERIELS & MODALITES DE TESTS

2-1 Présentation des prototypes de cagoule et des échantillons textiles livrés pour tests

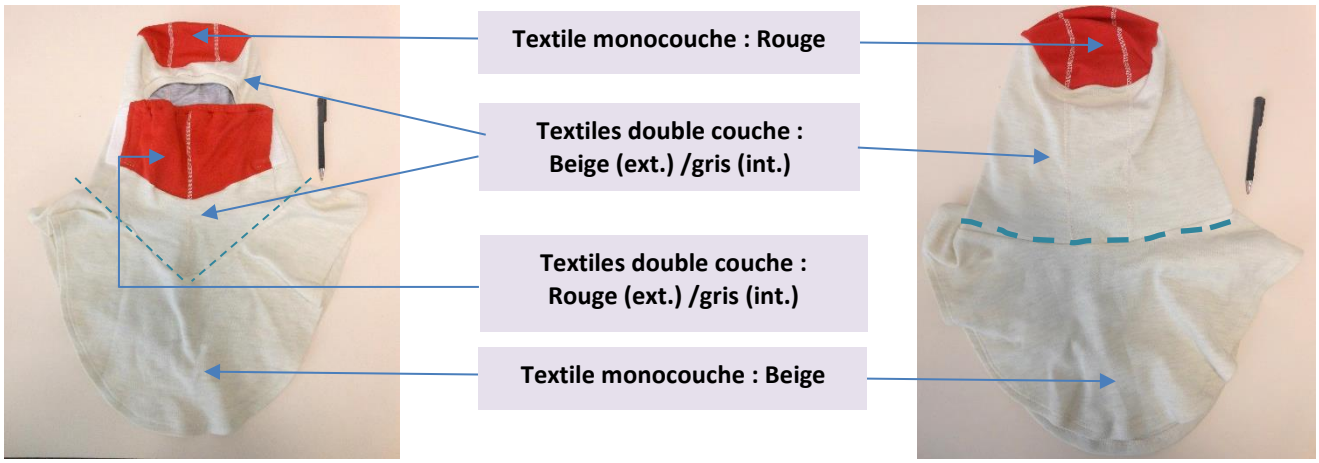
Deux prototypes de cagoules sont livrés pour tests. Les deux modèles décrits ci-après présentent une différence au niveau de la protection de la bouche. Le détail de leur conception est décrit ci-après en considérant tout d'abord l'endroit et l'envers, puis l'avant et l'arrière des prototypes.

D'autres échantillons textiles correspondant aux éléments constituant la cagoule, sont livrés sous forme circulaire pour les essais en laboratoire. Ils sont identifiés par leur couleur respective.

2-1-1 Prototype de cagoule N°1

Le prototype de cagoule N°1 est façonné de 4 assemblages réalisé avec trois textiles différents (textile rouge, beige et gris), utilisés en simple ou en double couche. Le schéma ci-après précise chaque élément de conception.

Prototype N°1 à l'endroit



Devant **Derrière**

Fig.1 : Présentation du prototype N°1 à l'endroit

Les deux textiles rouge et beige utilisés en simple couche sont localisés respectivement sur le haut du crâne et au niveau du plastron de la cagoule. Le reste de la cagoule qui protège la face, le cou à l'avant comme à l'arrière, est constitué par un assemblage de textiles rouge ou beige doublé du textile gris.

Fig.2 : Structure faciale du prototype N°1 à l'endroit

Au niveau de la bouche, le rectangle de textile rouge (extérieur) et gris (intérieur) est fixé par deux bandes auto agrippantes cousues verticalement de chaque côté de la bouche permettant une ouverture et une fermeture rapide.

Prototype N°1 à l'envers :

L'image de l'envers de la cagoule présentée ci-dessous permet de visualiser les différents assemblages utilisés et en particulier le textile gris utilisé en doublure.

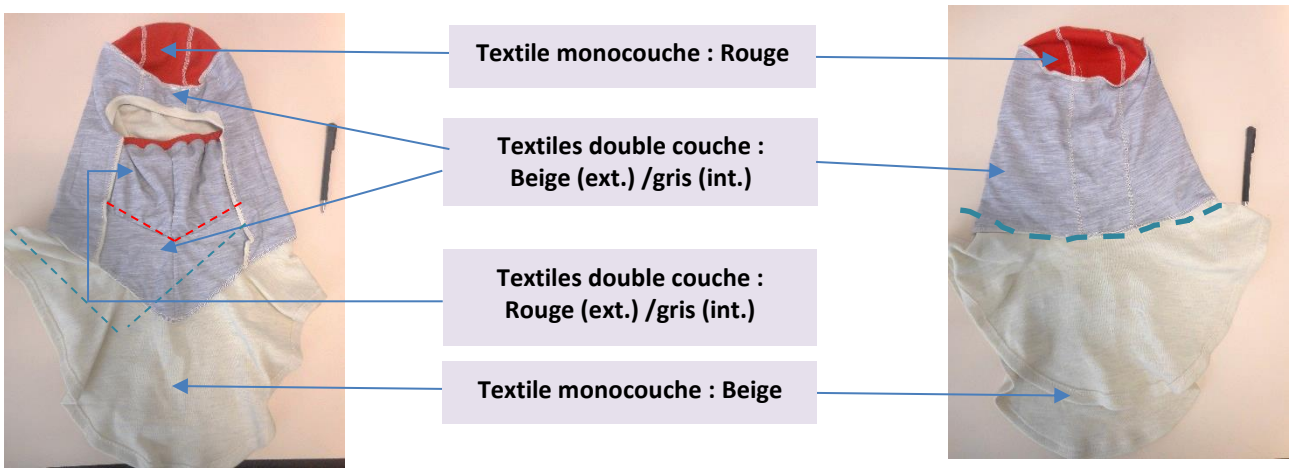


Fig.3 : Présentation du prototype N°1 à l'envers

2-1-2 Prototype de cagoule N°2

Le prototype N°2 est globalement identique au N°1 dans sa confection, sauf au niveau de la protection de la bouche où est prévu un compartiment pour loger un demi-masque filtrant.

Fig.4 : Présentation du prototype N°2 à l'envers

L'introduction et le retrait du masque est facilité par la présence d'une petite bande auto agrippante cousue au niveau du menton.

Le demi-masque livré pour test, de marque **BENEHAL NIOSH (Référence N95 P/N MS 6175L)** est à base de charbon actif. Cet élément est livré en deux exemplaires.

Fig.5 : Demi-masque filtrant au charbon actif livré pour test avec la cagoule N°2

2-1-3 Echantillons de textiles circulaires

Pour la réalisation des essais de filtration actifs et passifs, des échantillons de textiles sont également livrés en pastilles circulaires de 200 mm de diamètre. Le tableau ci-dessous dresse la liste complète des 5 assemblages à étudier, correspondant aux différentes parties des cagoules.

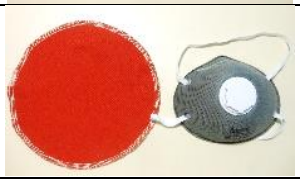
ECHANTILLONS	PHOTOS
Monocouche « Rouge »	
Monocouche « Beige »	
Assemblage « beige/gris »	
Assemblage « Rouge/gris	
Assemblage « Rouge/filtre charbon »	

Tableau 1 : Liste des assemblages de textiles à tester en filtration active et passive

2-2 Matériels de mesures

Les matériels de mesure employés dans ces essais vont permettre de caractériser à la fois la fumée produite par la combustion de végétaux méditerranéens, mais aussi celle qui traverse potentiellement les textiles étudiés. Cette caractérisation repose sur trois types d'analyses complémentaires : le dosage de trois gaz toxiques, celui des particules fines et ultrafines ainsi que l'identification des nombreux composés organiques contenus dans la fumée.

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

Le dosage des gaz toxiques porte sur **l'acroléine**, le **monoxyde de carbone 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.6 : Pompe de prélèvements et tubes colorimétriques GAZDETECT

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

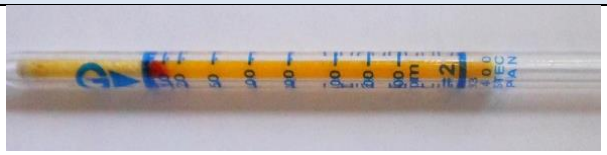
Type de composé dosé	Colorations caractéristiques	Gammes de concentrations
Acroléine	 **Passage de l'orange au rouge**	**3.3 à 10 ppm pour 4 volumes** **10 à 800 ppm pour 2 volumes**
Monoxyde de carbone CO *Gamme haute*	**Passage du jaune au brun-noir**	**2.5 à 25 ppm pour 2 volumes** **25 à 1000 ppm pour 1 volume** **1000 à 2000 pour 1/2 volume**
Formaldéhyde *Gamme basse*	**Passage du blanc au jaune**	**2 à 20 ppm pour 2 volumes** **20 à 50 ppm pour 1 volume** **50 à 100 pour 1/2 volume**

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des tubes colorimétriques GAZDETECT utilisés

2-2-2 Dosage des particules fines et ultrafines 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 l'intervalle de concentration compris entre **0.001 et 400 mg/m^3**. L'étendue granulométrique des particules étudiées comprend 4 tailles : 10, 4, 2.5, et 1 µm, notées PM10, PM4, PM2.5 et PM1.

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.7 : Compteur de particules DUST TRACK II

Pour séparer les différentes tailles de particules, l'appareil aspire l'air ambiant avec un débit de **3 l/min** 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 **PM_{10}, PM_4, $PM_{2.5}$ et PM_1.**

Fig.8 : 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.

Lorsque la concentration en particules fines excède la valeur de 400 mg/m^3, il est fait une estimation de la concentration au moyen d'un **opacimètre à échelle Brignon** (teneur en suies de 1 à 8) préalablement calibré. L'abaque utilisé est représenté ci-dessous.

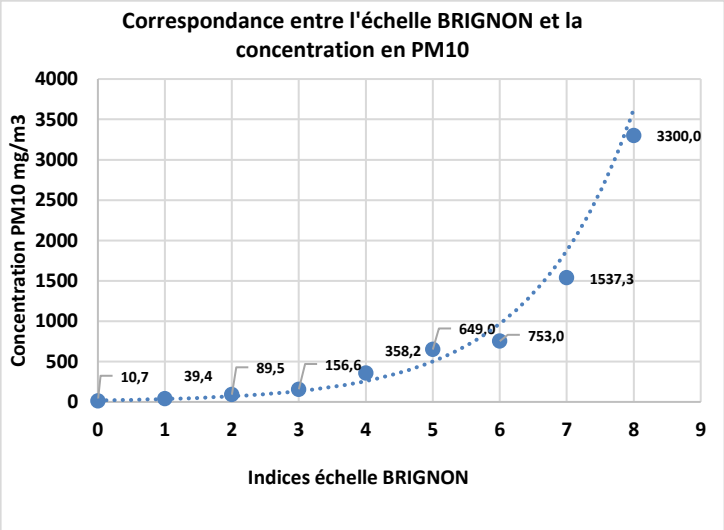


Fig.9 : Opacimètre pour fumées denses et correspondance de l'échelle Brignon en concentration PM10

Par ailleurs, un compteur de particules ultrafines de marque **TSI modèle P-TRAK** est loué pour les essais, afin de compléter l'étude des performances de filtration des textiles et quantifier les particules de diamètre compris entre **0.02 et 2 microns**. L'appareil mesure dans la plage de concentration comprise entre **0 et 500 000 pt/cm^3**.

Fig.10 : Appareil de mesures des particules ultrafines de 0.02 à 2 microns et accessoires - P-TRAK

Le principe de mesure utilisé est celui des compteurs de particules à condensation : les particules sont saturées d'alcool avant leur mesure par diffraction lumineuse. L'alcool isopropylique consommé à raison d'1ml/h est utilisé pour grossir artificiellement les particules microscopiques dans l'air afin de les transformer en gouttelettes plus grosses qui sont alors détectées et comptées par l'appareil.

2-2-3 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 Spectrométrie) est la technique de laboratoire utilisée pour détecter et identifier 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).

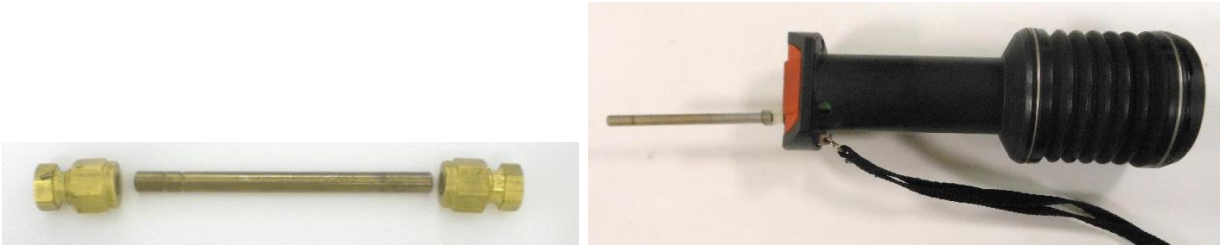


Fig.11 : Tube « Tenax » et pompe de prélèvement pour le système GC-MS

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.

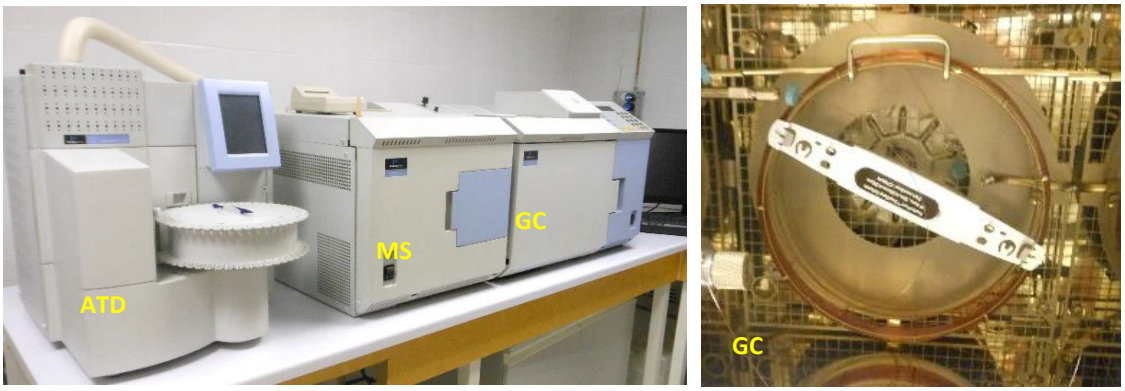


Fig.12 : Appareillages du système GC-MS et colonne capillaire du GC

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 %.

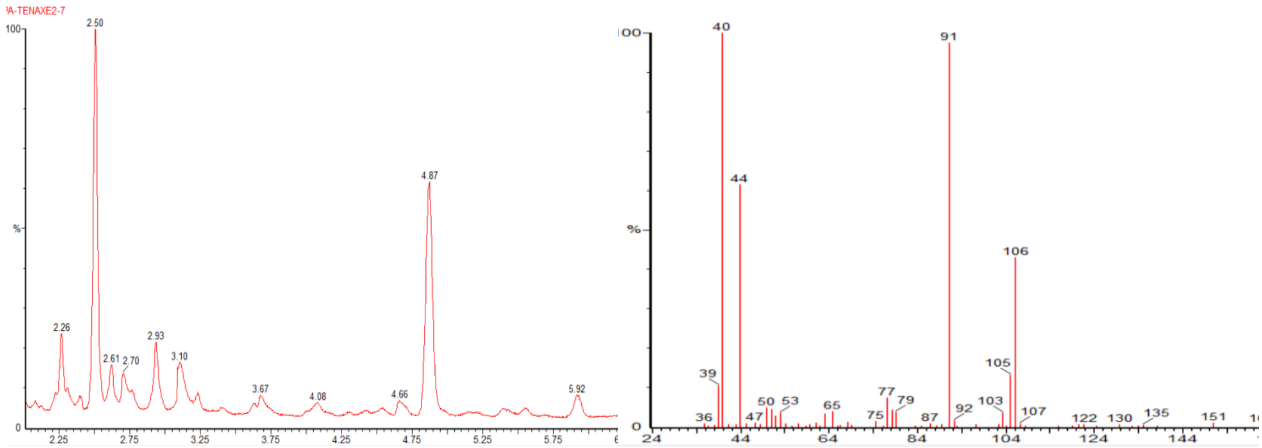


Fig. 13 : Exemples de chromatogramme en fonction du temps d'élution et d'un spectre de masse

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

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 du système GC-MS sont rassemblées 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 3 : Détail des conditions opératoires du GC-MS

2-3 Dispositifs expérimentaux mis en œuvre

Trois dispositifs expérimentaux sont mis en œuvre en laboratoire pour évaluer les performances de filtration des «éléments de cagoule vis-à-vis d'une fumée de végétaux enflammés. Ces dispositifs sont préalablement raccordés à un générateur de fumée.

2-3-1 Générateur de fumée

La fumée est produite par la combustion de 4 végétaux déshydratés, prélevés sur le site de Valabre et représentant le couvert méditerranéen : le chêne Kermès, le pin d'Alep, le romarin et les herbacées.

Fig. 14 : Végétaux méditerranéens déshydratés et générateur de fumée

Placés dans un générateur de type « enfumoir », le combustible est enflammé tandis que la fumée produite est aspirée en continu tout au long de l'essai. Elle rejoint ainsi les différents dispositifs de tests présentés ci-dessous.

2-3-2 Dispositif de test actif sous aspiration

Le premier dispositif expérimental nommé **« test actif sous aspiration »** permet d'évaluer les performances de filtration des différents textiles. Le débit d'aspiration est mesuré au moyen d'un anémomètre (*Mesure réalisée avec l'anémomètre Kestrel 1000, à ± 0.1m/s) placé directement devant l'échantillon. **Il doit se rapprocher de celui d'une respiration humaine en condition d'effort, estimée entre 100 à 135 l/min.**

Le débit volumique en m^3/s (convertit en l/min) est égal à la vitesse de l'air en m/s, multiplié par la section de passage en m^2.

Fig. 15 : Anémomètre Kestrel pour la mesure des vitesses d'aspiration au travers des textiles

Le dispositif expérimental comprend une première enceinte E1, nommée enceinte d'enfumage qui reçoit la fumée à forte densité et où est installé l'échantillon. Ce dernier est maintenu à l'entrée d'un tube en pvc de diamètre 45mm, grâce à un joint torique assurant son étanchéité. Ce tube rejoint ensuite une deuxième enceinte E2 qui reçoit l'air filtré par l'échantillon (aspiration active), elle-même raccordée au système d'aspiration. Le schéma de principe du dispositif est présenté ci-dessous.

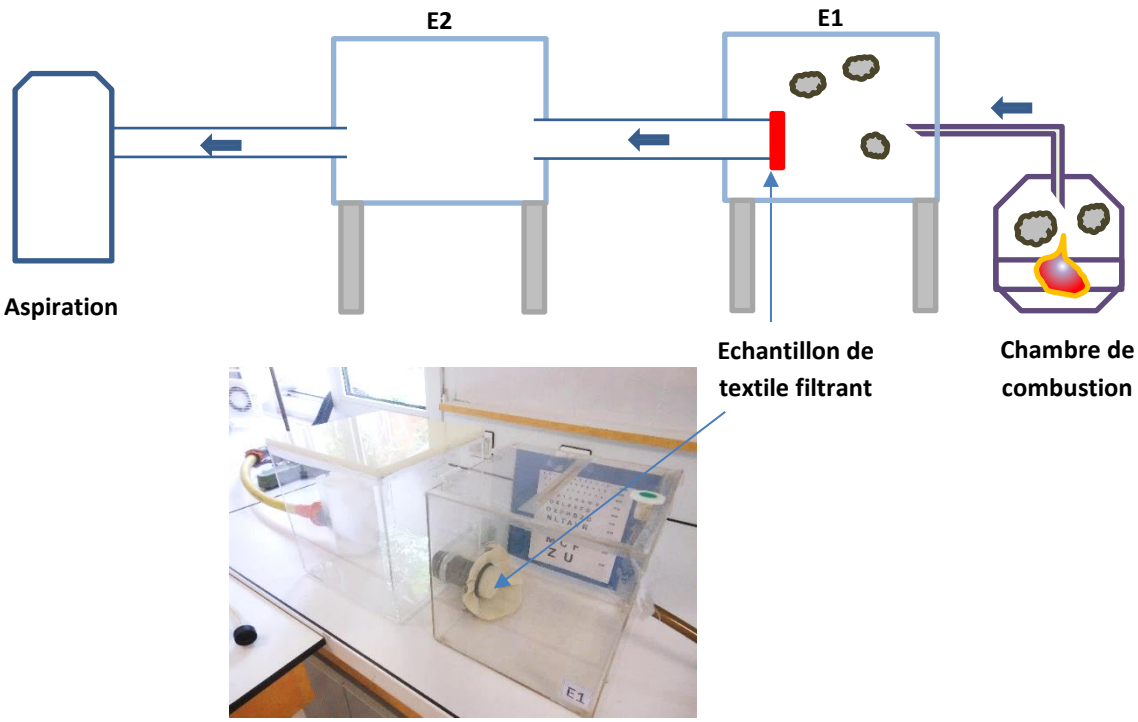


Fig. 16 : Schéma de principe et photo du dispositif de test sous aspiration active

2-3-3 Dispositif de test passif

Un deuxième dispositif permet de tester l'efficacité des éléments de cagoule de manière passive.

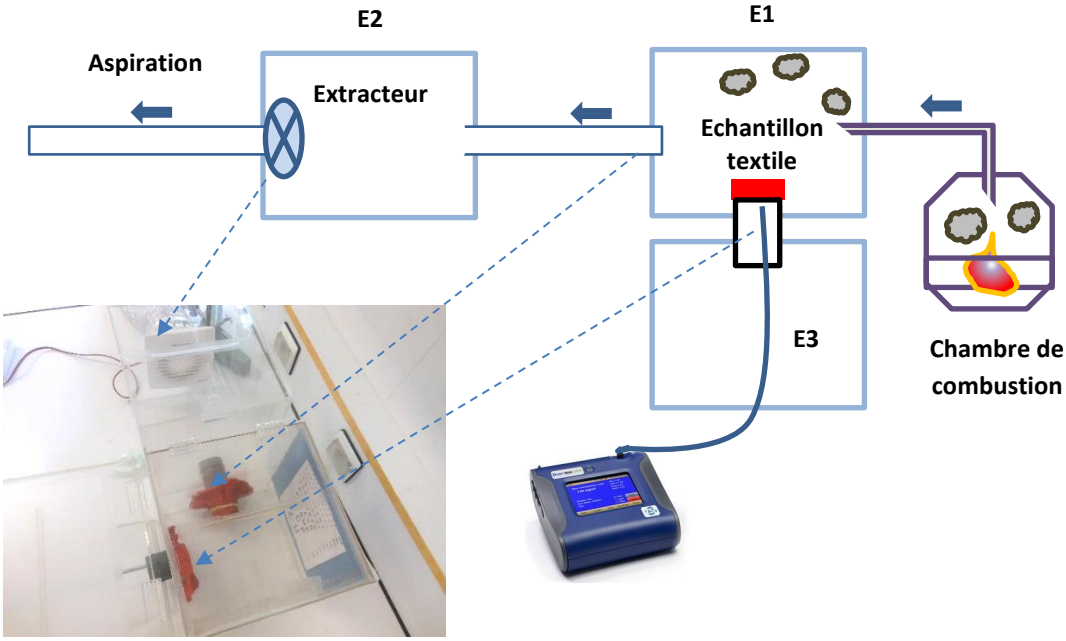


Fig. 17 : Schéma de principe et photo du dispositif de test passif (vue de dessus)

L'échantillon textile est installé sur l'extrémité d'un tube pvc de 45mm de diamètre, placé dans l'enceinte E1 et raccordé à l'enceinte E3. Après enfumage de E1 et E2, l'aspiration est stoppée. Le phénomène de diffusion passive au travers de l'échantillon peut alors s'effectuer librement dans le compartiment E3 en absence de mouvement d'air. Les mesures de teneurs en particules fines et ultrafines s'effectuent à l'arrière l'échantillon exposé à la fumée, grâce à une canne de prélèvement introduite dans le tuyau PVC de l'enceinte E3.

2-3-4 Test global sur support facial

Le test global sur support facial est réalisé directement sur le prototype de cagoule pour étudier ses performances en se rapprochant davantage des conditions d'utilisation. Le support facial est une tête de mannequin, préalablement traversée de part en part au niveau de la bouche, par un tuyau pvc en diamètre 45mm. L'étanchéité de la cagoule est effectuée par ajustage et ajout de ruban adhésif au niveau du visage.

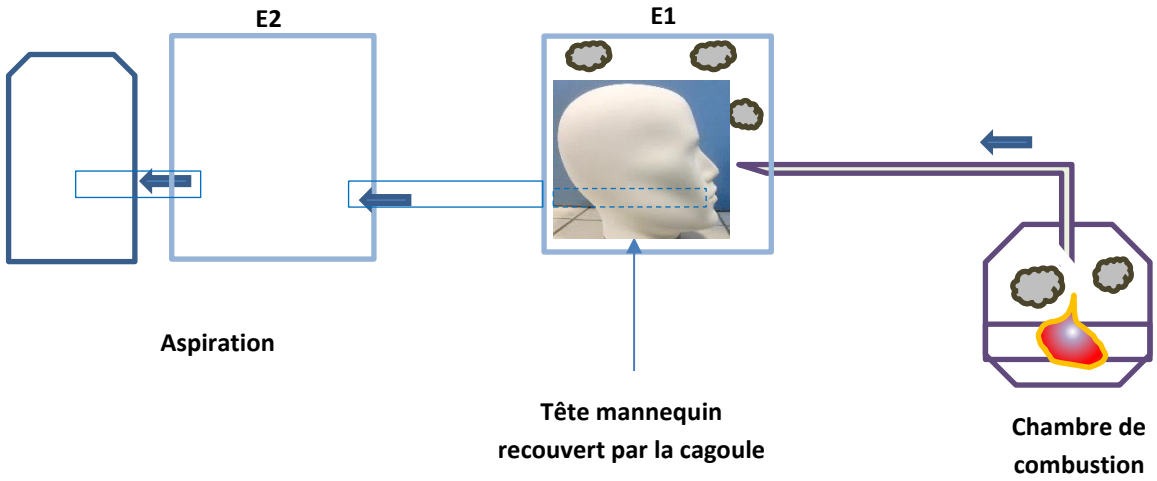


Fig. 18 : Schéma de principe du dispositif de test global sur support facial

La tête équipée est placée dans l'enceinte E1 puis soumise à l'aspiration d'une fumée dense. Les gaz aspirés arrivent directement dans l'enceinte E2 pour les mesures de particules fines et ultrafines. Le débit d'aspiration est maintenu au minimum à **135 l/min** pour simuler une respiration en conditions d'effort intenses.

Les mesures sont également réalisées de manière passive au niveau de l'enceinte E1 grâce à des tubulures installées sous la cagoule et reliées aux différents compteurs de particules.

L'ensemble de ces matériels et dispositifs mis en œuvre donnent les résultats détaillés au paragraphe suivant.

3- RESULTATS

3-1 Tests actifs sous aspiration

Dans les conditions de repos, un individu à un débit respiratoire compris entre **6 et 11 l/min**. Dans les conditions d'effort, ce débit augmente à **100-120 l/min** pour un sujet peu actif et jusqu'à **150-200l/min** pour un individu endurant. Les tests actifs sous aspiration visent à reproduire ces conditions de respiration, faibles, modérées et intenses. C'est pourquoi le comportement des textiles est étudié sous différents débits d'aspiration : aspiration modérée, en condition d'effort et sous aspiration forcée.

3-1-1 Mesure des débits d'aspiration au niveau des échantillons en absence de fumée

3-1-1-1 Débits d'air sous aspiration modérée

La prise de mesure des débits est réalisée sur deux points différents : devant l'échantillon dans l'enceinte E1 et à l'arrière du textile dans l'enceinte E2. L'aspiration employée est celle d'un extracteur. Le tableau ci-dessous rassemble les résultats obtenus sur les différents échantillons.

Type d'échantillon	Devant l'échantillon E1 Débit l/min	Arrière de l'échantillon E2 Débit l/min
Textile rouge monocouche	**57.2**	**57.2**
Textile beige monocouche	**57.2**	**57.2**
Assemblage textiles gris (int.)/rouge (ext.)	**0**	**0**
Assemblage textiles gris (int.)/beige (ext.)	**0**	**0**
Assemblage filtre charbon (int.)/rouge (ext.)	**0**	**0**

Tableau 4 : Débits d'aspiration en condition modérée

En conditions d'aspiration modérée, les débits d'air au niveau des échantillons rouge ou beige monocouches sont de **57.2 l/min**. En présence des assemblages rouge/gris, beige/gris et rouge/filtre à charbon le débit d'air est nul. Plus aucune circulation d'air n'est mesurée entre les deux compartiments. Il est donc nécessaire d'augmenter le système d'aspiration pour assurer un passage d'air suffisant entre E1 et E2 en présence des assemblages.

3-1-1-2 Débits d'aspiration en conditions d'effort

Dans les conditions d'effort, les débits sont compris entre **100 et 200** l/min. L'obtention d'un tel débit au niveau des assemblages est obtenue grâce une aspiration plus puissante.

Type d'échantillon	Devant l'échantillon E1 Débit l/min	Arrière de l'échantillon E2 Débit l/min
Assemblage textiles gris (int.)/rouge (ext.)	**124**	**162**
Assemblage textiles gris (int.)/beige (ext.)	**134**	**181**
Assemblage filtre charbon (int.)/rouge (ext.)	**143**	**200**

Tableau 5 : Débits d'aspiration en condition d'effort

Les débits mesurés en présence des assemblages rouge/gris et beige/gris sont compris entre **124 et 184 l/min**. L'assemblage rouge/ filtre charbon-rouge présente est davantage poreux d'où un débit plus élevé compris entre **143 et 200 l/min.**

Ces résultats montrent que les assemblages rouge/gris et beige/gris sont peu respirants.

3-1-1-2 Débits d'aspiration en présence de fumée

L'étude des variations de débit est également réalisée en présence d'une fumée dense. Leur mesure en continu s'effectue dans les conditions d'enfumage de l'enceinte E1. Pour les textiles monocouches, le débit reste constant au passage de la fumée. Ce n'est pas le cas des assemblages rouge/gris, beige/gris et rouge/filtre charbon, dont les débits diminuent en fonction du temps. Le tableau ci-dessous présente la baisse des débits calculés en % en fonction du temps d'aspiration.

Echantillon Rouge/gris		Echantillon Beige/gris		Echantillon Rouge/filtre charbon	
Temps s	Baisse %	Temps s	Baisse %	Temps s	Baisse %
0	**0**	0	**0**	0	**0**
5	**6**	4	**5**	10	**0**
10	**18**	13	**35**	33	**0**
14	**24**	16	**40**	50	**7**
18	**29**	19	**45**	73	**13**
26	**35**	22	**50**	103	**20**
29	**41**	25	**55**	150	**20**
39	**59**	28	**60**	180	**20**
43	**65**	33	**65**	240	**27**
48	**71**	44	**70**	300	**33**
53	**76**	51	**75**	390	**40**
56	**82**	55	**80**	420	**47**
60	**100**	57	**85**	490	**53**
		60	**100**		

Tableau 6 : Mesure des débits d'aspiration en fonction du temps et en présence de fumées denses

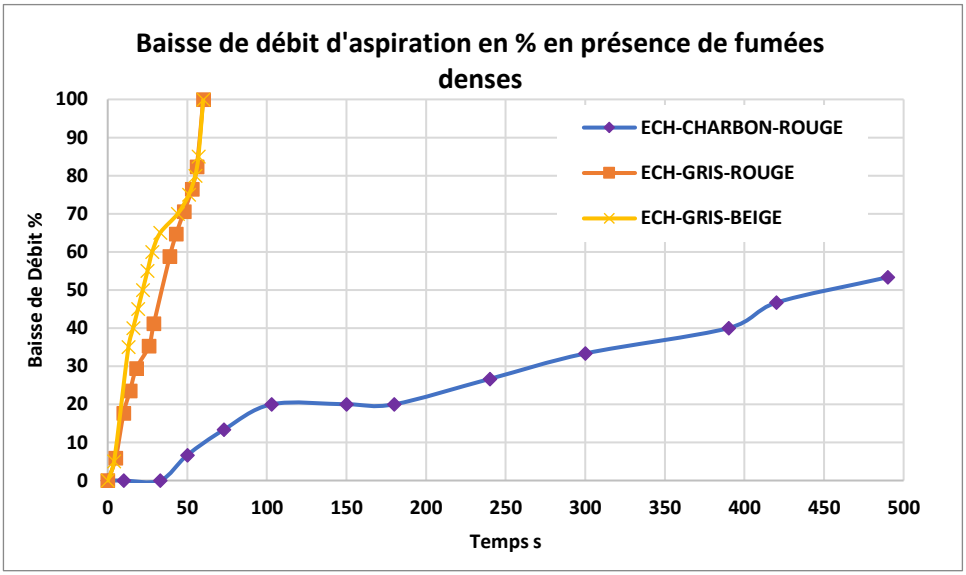


Fig. 19 : Cinétiques de saturation des échantillons en double couche sous aspiration de fumées denses

Ce pourcentage de baisse traduit une obstruction des fibres par les particules et les suies qui traversent le textile, jusqu'à saturation et colmatage total. Une minute d'aspiration de fumées denses suffit à provoquer la saturation totale du textile gris utilisé en doublure, tandis que la demi-saturation survient entre 22 et 35 secondes. Ces temps sont très courts comparés à ceux de l'assemblage textile rouge/filtre à charbon dont, la demi-saturation est atteinte après seulement 8 minutes d'aspiration dans les mêmes conditions expérimentales.

En fin d'essai, le textile gris présente des auréoles brunes à forte odeur de fumée assez difficiles à éliminer après lavage.

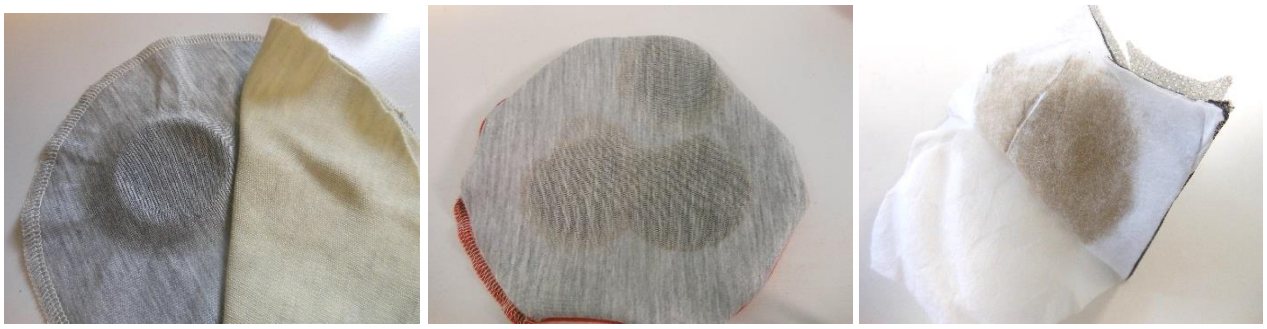


Fig. 20 : Saturation du textile gris et du filtre à charbon après filtration de fumées denses

<u>Remarque</u> : Ce phénomène de saturation du textile gris reste à évaluer en conditions opérationnelles afin d'estimer un temps optimal d'utilisation. Il pose également question quant à la respirabilité du textile vis-à-vis de l'utilisateur et par conséquent de sa tolérance physiologique.

3-1-2 Dosage des gaz toxiques

Les tests actifs sous aspiration donnent également lieu à l'analyse des gaz toxiques présents dans les deux enceintes E1 et E2 en présence des cinq échantillons respectifs. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Echantillons textiles	Acroléine ppm		CO ppm		Formaldéhyde ppm	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2
Rouge	3	0	100	25	4	2
Beige	0	0	200	50	4	2
Rouge/Gris	3	0	400	0.5	8	0
Beige/Gris	< 3	0	300	< 0.5	4	0
Rouge/Charbon	3	0	200	25	4	0

Tableau 7 : Concentrations en ppm de l'acroléine, du CO et du formaldéhyde dans les enceintes E1 et E2

3-1-2-1 Concentrations en acroléine

La molécule **d'acroléine** est un composé toxique et irritant de la peau et des muqueuses oculaires et nasales. Il est hautement lacrymogène et cause une diminution de la capacité respiratoire et de la fonction pulmonaire, avec hyperréactivité bronchique. Dans le nez et le système respiratoire, si l'exposition perdure, l'irritation peut évoluer vers une inflammation avec hémorragie, métaplasie, hyperplasie et œdème.

Les concentrations en acroléine dans les fumées de végétation sont en limite de détection par rapport à la gamme utilisée et seule disponible. En effet, elles n'excèdent pas **3 ppm** dans l'enceinte E1 tandis que la molécule n'est jamais détectée dans E2, quel que soit l'échantillon traversé. La conversion des ppm en mg/m^3 donne une concentration en acroléine de **6.9 mg/m^3** dans les fumées de l'enceinte E1, ce qui est 1000 fois plus concentré que la valeur seuil en exposition de courte durée. En effet, l'ANSES a proposé en 2013 comme valeurs guides pour la qualité de l'air intérieur les concentrations suivantes :

- pour une exposition de courte durée (1 heure) : **6,9 µg/m^3 d'air**,
- pour une exposition longue durée (plus d'un an) : **0,8 µg/m^3 d'air.**

3-1-2-2 Concentrations en monoxyde de carbone CO

Le **monoxyde de carbone CO** est présent en quantité importante dans la fumée de combustion issue de la végétation. Dans l'enceinte E1, les concentrations mesurées sont comprises entre 100 et 400 ppm, soit une concentration de **115.6 à 458.2** mg/m^3.

Dans l'enceinte E2, les concentrations sont 4 fois moins importantes en présence de textiles beige ou rouge comparé à la concentration mesurée dans E1. Ces textiles n'étant pas à priori filtrants, la concentration mesurée correspond au transfert maximum de CO entre les deux enceintes.

En présence de l'assemblage textile rouge/charbon actif, la concentration mesurée dans E1 étant de 200, la mesure de E2 devrait être de 50 ppm au lieu de 25ppm. **Ceci indique que le filtre à charbon piège la moitié de CO transféré de E1 vers E2.**

En revanche, la présence du textile gris placé en doublure entraîne une chute drastique des concentrations de CO mesurées dans E2, avec des valeurs voisines de 0.5 ppm pour 400 ppm dans E1. Avec une telle concentration dans E1 et en absence de filtration, la concentration dans E2 devrait être de 100 ppm. L'interception du textile gris permet d'abaisser de **200 fois** la concentration de CO dans E2, soit par un phénomène de filtration avec piège des molécules de CO, soit par saturation du textile qui bloque la circulation des gaz.

Les concentrations de CO en mg/m^3 donnent des valeurs comprises entre **115 et 458 mg/m^3** dans E1. Dans E2, elles atteignent **28 à 57 mg/m^3** pour les textiles rouge et beiges et **0.6 mg/m^3** pour les mêmes textiles doublés du textile gris.

A titre de comparaison, l'AFSSET a publié en 2007 des "valeurs guides de qualité d'air intérieur":

- 10 mg/m^3, pour une exposition de 8 h,
- 30 mg/m^3, pour une exposition d'1 h,
- 60 mg/m^3, pour une exposition de 30 min,
- 100 mg/m^3, pour une exposition de 15 min.

3-1-2-3 Concentrations en formaldéhyde

Le **formaldéhyde** très irritant pour la peau, le nez, la gorge et les yeux, est un allergène et un cancérogène avéré pour le rhinopharynx puisque 98% de la dose inhalée est retenue au niveau de la muqueuse nasale. A titre d'information, L'AFSSET fait état en 2009 d'études épidémiologiques mettant en évidence des niveaux de risque de cancer du nasopharynx associés une exposition répétée de pics d'au moins **5 mg/m^3.**

Il est dosé dans l'enceinte E1 et donne des concentrations de **4 et 8 ppm** au maximum, soit des valeurs de **4.9 à 9.8 mg/m^3**. Dans l'enceinte E2, la concentration en formaldéhyde est de **2 ppm,** soit **2.5 mg/m^3,** dans le cas des textiles monocouches rouge ou beige. En présence du textile gris en doublure ou du filtre à charbon, la molécule n'est plus détectée.

3-1-3 Dosages des particules fines et ultrafines

3-1-3-1 Particules fines

La concentration en particules fines de taille 10, 4, 2.5 et 1 µm de diamètre est comparée dans les enceintes E1 et E2, en présence de fumées claires et denses. Il est calculé le rapport moyen de ces concentrations (E1/E2) ainsi que le pourcentage de particules interceptées sur la base de quatre essais consécutifs. Les résultats sont présentés ci-dessous pour chaque échantillon textile.

- **Textile beige en monocouche :**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	300	167	1.8	55.7
	4	228	160	1.4	70.2
	2.5	277	141	2.0	50.9
	1	236	131	1.8	55.5
Moyenne				**1.7**	**58.1**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	385	215	1.8	55.8
	4	343	193	1.8	56.3
	2.5	324	169	1.9	52.2
	1	271	165	1.6	60.9
Moyenne				**1.8**	**56.3**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	171	73.9	2.3	43.2
	4	169	81.0	2.1	47.9
	2.5	155	74.5	2.1	48.1
	1	158	71.9	2.2	45.5
Moyenne				**2.2**	**46.2**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	113	57.8	2.0	51.2
	4	100	61.8	1.6	61.8
	2.5	86.4	49.7	1.7	57.5
	1	93.7	53.2	1.8	56.8
Moyenne				**1.8**	**56.8**

Tableau 8 : Dosage particules fines sous aspiration – Textile beige

En présence du textile beige, le rapport des concentrations en particules fines entre E1 et E2, toutes tailles confondues, est en moyenne de **1.9**. Le pourcentage moyen de particules ayant traversé l'échantillon atteint **54.4%,** toutes tailles confondues**,** soit un taux d'interception de **45.6%.**

- **Textile rouge en monocouche :**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	212	108	2.0	50.9
	4	211	100	2.1	47.4
	2.5	224	91.5	2.4	40.8
	1	193	91.0	2.1	47.2
Moyenne				**2.2**	**46.6**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	117	56.1	2.1	47.9
	4	110	58.2	1.9	52.9
	2.5	99.8	51.2	1.9	51.3
	1	84.7	48.9	1.7	57.7
Moyenne				**1.9**	**52.5**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	185	69.0	2.7	37.3
	4	162	60.4	2.7	37.2
	2.5	150	62.8	2.4	41.9
	1	142	47.6	3.0	33.5
Moyenne				**2.7**	**37.5**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	380	106	3.6	28.0
	4	354	101	3.5	28.5
	2.5	331	94.9	3.5	28.7
	1	327	93.9	3.5	28.7
Moyenne				**3.5**	**28.5**

Tableau 9 : Dosage particules fines sous aspiration – Textile rouge

De la même manière, le textile rouge placé sur le porte échantillon donne un rapport moyen E1/E2 égal à **2.6**. Le pourcentage de particules ayant traversé ce textile atteint **41.3%** en moyenne avec des variations plus importantes. Le taux d'interception des particules fines est donc de **58.7%**

- **Assemblage beige/gris :**

Fumées claires					
Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	101	0.437	231.1	0.43
	4	95.6	0.453	211.0	0.47
	2.5	100	0.215	465.1	0.22
	1	84	0.293	286.7	0.35
Moyenne				**299**	**0.37**

Fumées denses					
Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	1500	0.301	4983	0.02
	4		0.402	3731	0.03
	2.5		0.254	5906	0.02
	1		0.364	876	0.02
Moyenne				**3874**	**0.02**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	260	0.284	915.5	0.11
	4	243	0.407	597.1	0.17
	2.5	247	0.316	781.6	0.13
	1	220	0.191	1151.8	0.09
Moyenne				**862**	**0.13**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	1500	0.470	3191.5	0.03
	4		0.500	3000.0	0.03
	2.5		0.355	4225.4	0.02
	1		0.292	5137.0	0.02
Moyenne				**3889**	**0.03**

Tableau 10 : Dosage particules fines sous aspiration – Textile beige/gris

L'assemblage beige/gris permet d'intercepter la quasi-totalité des particules fines contenues dans la fumée avec un rapport E1/E2 variant de **299 à 3889**. Le pourcentage de particules ayant traversé les textiles est très faible et varie de **0.37 à 0.02%.** Le textile gris permet d'intercepter **99.6%** à **100%** des particules fines contenues dans la fumée.

- **Assemblage rouge/gris :**

Il en va de même pour l'assemblage rouge/gris testé dans des conditions comparables, en faisant varier la densité de la fumée.

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	58.0	0.108	537	0.19
	4	57.7	0.243	237	0.42
	2.5	47.9	0.116	413	0.24
	1	43.8	0.095	145	0.22
Moyenne				**333**	**0.27**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	295	0.116	2543	0.04
	4	299	0.334	895	0.11
	2.5	260	0.232	1121	0.09
	1	212	0.226	938	0.11
Moyenne				**1374**	**0.09**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	222	0.196	1133	0.09
	4	221	0.291	760	0.13
	2.5	201	0.500	402	0.25
	1	191	0.373	512	0.20
Moyenne				**702**	**0.17**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	650	0.550	1181.8	0.08
	4		1.120	580.4	0.17
	2.5		0.318	2044.0	0.05
	1		0.462	1406.9	0.07
Moyenne				**1303**	**0.09**

Tableau 11 : Dosage particules fines sous aspiration – Textile rouge/gris

Le rapport des concentrations de E1/E2 varie de **353 à 1374** et le pourcentage de particules ayant traversé l'assemblage rouge/gris varie de **0.27 à 0.09%**, selon la densité de la fumée, soit un pourcentage d'interception compris entre **99.8% et 99.9%**. Ces résultats sont équivalents à ceux de l'assemblage beige/gris.

➢ **Assemblage rouge/ filtre charbon :**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	108	1.730	62.4	1.60
	4	104	1.080	96.3	1.04
	2.5	105	0.922	114	0.88
	1	69.1	0.721	95.8	1.04
Moyenne				**92**	**1.14**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	216	2.110	102.4	0.98
	4	244	1.510	161.6	0.62
	2.5	178	1.250	142.4	0.70
	1	141	1.180	119.5	0.84
Moyenne				**132**	**0.79**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	172	1.620	106.2	0.94
	4	161	1.310	122.9	0.81
	2.5	103	1.230	83.7	1.19
	1	75.3	1.109	67.9	1.47
Moyenne				**95**	**1.10**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m³	E2 mg/m³	RAPPORT E1/E2	%
10	10	294	1.900	154.7	0.65
	4	283	1.410	200.7	0.50
	2.5	199	1.640	121.3	0.82
	1	226	1.470	153.7	0.65
Moyenne				**158**	**0.66**

Tableau 12 : Dosage particules fines sous aspiration – Textile rouge/filtre charbon

En présence de l'assemblage rouge/filtre charbon, le rapport E1/E2 est un peu moins élevé et varie entre **92 et 158.** Le pourcentage de particules qui traversent le filtre varie de **0.66 à 1.14%,** soit un taux d'interception élevée, compris entre **98.9 et 99.3%.**

Les résultats des mesures de particules fines lors des tests actifs sous aspiration sont rassemblés dans le graphe ci-dessous.

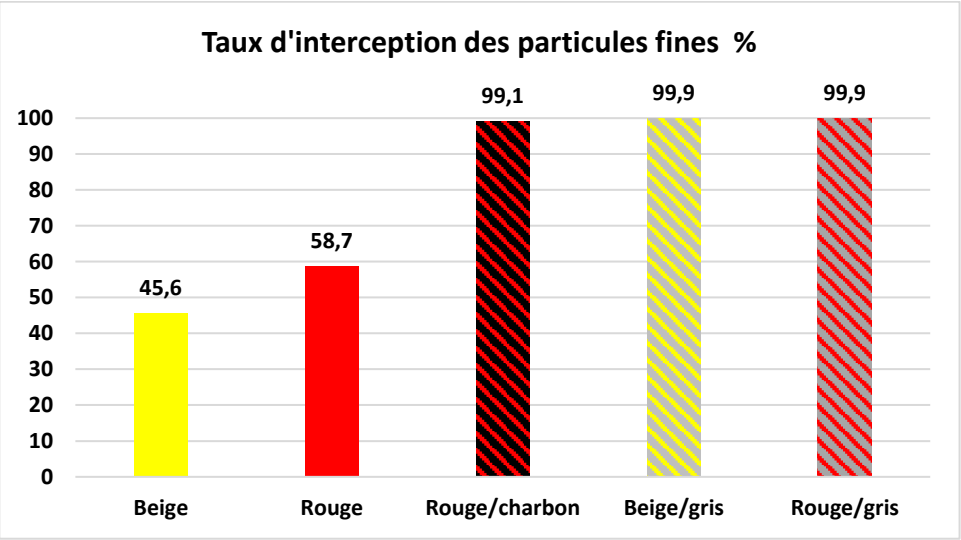


Fig. 21 : Taux d'interception du textile gris et du filtre à charbon après filtration de fumées denses

La doublure grise et le filtre à charbon assurent une filtration efficace des particules fines.

3-1-3-2 Particules ultrafines

Les mesures de particules ultrafines sont réalisées dans les conditions expérimentales précédentes après introduction de la sonde télescopique de l'appareil P-TRAK dans l'enceinte E2. L'appareil quantifie les particules de diamètre 0.02 à 2 microns dans la gamme de concentration comprise entre 0 et 500 000 pt/cm^3. Dans tous les cas, l'enceinte E1 présente une concentration en particules ultrafines supérieure à la plage de mesure de l'appareil (saturation).

Les résultats donnent une valeur minimale et maximale de la concentration dans E2 ainsi que la valeur moyenne sur la durée de mesure. Chaque type d'assemblage fait l'objet de deux tests avec contrôle des concentrations ambiantes du laboratoire. Le tableau et l'histogramme ci-dessous présentent les résultats obtenus pour chaque échantillon.

Modalités testées	Concentration min pt/cc	Concentration max pt/cc	Concentration moyenne pt/cc
Air ambiant	7 320	12 000	**10 885**
Beige	≥ 500 000		**≥ 500 000**
Rouge	≥ 500 000		**≥ 500 000**
Beige-gris	17 000	19 000	**17 850**
Rouge-gris	9 850	16 900	**12 944**
Rouge - Filtre charbon	208 000	365 000	**282 000**

Tableau 13 : Dosage des particules ultrafines – test actif sous aspiration

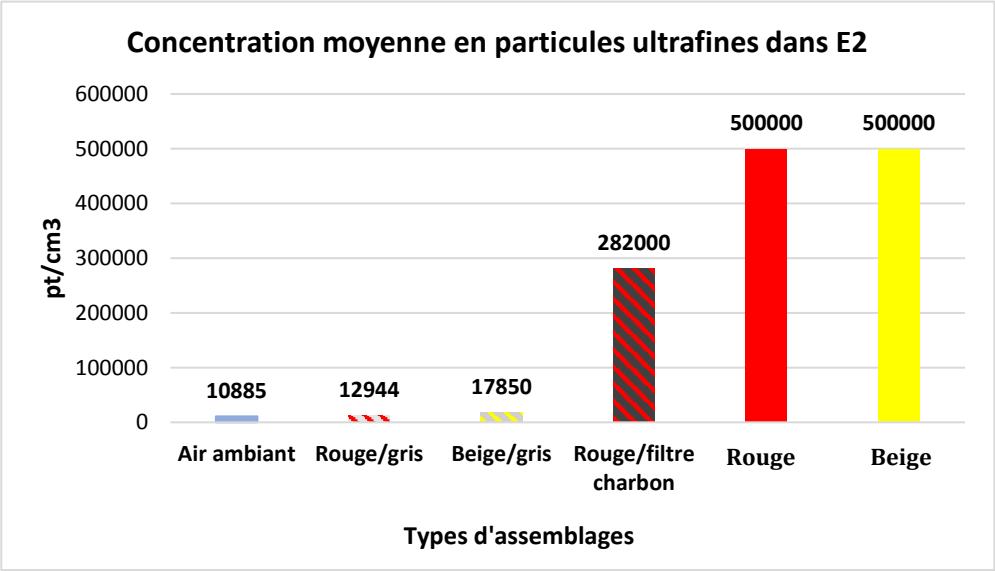


Fig. 22 : Dosage des particules ultrafines dans E2 pour chaque échantillon testé

Les textiles monocouches laissent passer la totalité des particules ultrafines aspirées. Ce n'est pas le cas des assemblages beige/gris et rouge/gris qui interceptent **96.4 et 97.4**% des particules ultrafines. La doublure apparait très performante pour filtrer les particules inférieures à 2 microns. Au contraire, le filtre à charbon sous le textile rouge, intercepte seulement **43.6%** des particules ultrafines.

En définitive, les résultats des mesures de particules fines et ultrafines sous aspiration active démontrent l'efficacité de la filtration du textile gris utilisé en doublure. Les échantillons sont ainsi classés par ordre croissant de performance filtrante :

Textile Beige < rouge < Rouge/filtre charbon < Beige/gris ≈ Rouge/gris

3-1-4 Analyse de la composition de la fumée par GC-MS

L'analyse de la fumée prélevée dans l'enceinte E2 est comparée à celle de l'enceinte E1 afin de connaître les composés gazeux ayant traversé les fibres des différents textiles. Les produits identifiés sur le chromatogramme sont classés en quatre catégories, selon l'intensité de leur pic calculé par la fonction intégration du logiciel Turbomass du GC/MS. On distingue ainsi les composés majoritaires, modérés, minoritaires et ceux à présents à l'état de traces.

Catégories de composés	Seuils d'intensité des pics
Composés majoritaires	**> 4.10^7**
Composés modérés	**1.10^7< x < 4.10^7**
Composés minoritaires	**0.5 10^7< x < 1.10^7**
Traces	**< 0.5 10^7**

Tableau 14 : Identification des seuils définissant les catégories de composés

3-1-4-1 Caractérisation de la fumée dans E1

L'analyse de la fumée de végétation initiale dans E1 révèle la présence de **40 molécules différentes**, identifiés par leur temps de rétention, leur nom chimique, leur masse molaire, leur formule brute et leur numéro d'identification CAS. Le tableau ci-dessous en dresse la liste détaillée.

Temps de rétention s	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.14	CARBON DIOXIDE	44	CO2	124-38-9
1.27	1,3-BUTADIENE	54	C4H6	106-99-0
1.42	BUTANE,N-	58	C4H10	106-97-8
1.46	1,3-BUTADIENE, 2-METHYL-	68	C5H8	78-79-5
1.51	PROPANEDINITRILE, METHYL-	80	C4H4N2	3696-36-4
1.56	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.63	CYCLOPENTENE	68	C5H8	142-29-0
1.67	PROPANAL, 2-METHYL-	72	C4H8O	78-84-2
1.80	1-PENTENE, 2-METHYL-	84	C6H12	763-29-1
1.90	FURAN, 2-METHYL-	82	C5H6O	534-22-5
1.96	2,4-HEXADIENE, (E,Z)-	82	C6H10	5194-50-3
2.23	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.27	1,3-CYCLOPENTADIENE, 1-METHYL-	80	C6H8	96-39-9
2.36	1,4-HEXADIENE	82	C6H10	592-45-0
2.47	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.59	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.73	CYCLOHEXENE	82	C6H10	110-83-8
2.90	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.04	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.20	FURAN, 2,5-DIMETHYL-	96	C6H8O	625-86-5
4.53	PYRROLE	67	C4H5N	109-97-7
4.83	BENZENE, METHYL-TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.50	1,5-HEXADIENE	82	C6H10	592-42-7
5.86	1-OCTENE CAPRYLENE	112	C8H16	111-66-0
6.28	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
7.38	CLOTRISILOXANE,HEXAMETHYL	222	C6H18O3Si3	541-05-9
10.26	BENZENE, ETHYL-	106	C8H10	100-41-4
11.07	BENZENE, 1,4-DIMETHYL- P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.19	BENZENE, 1,3-DIMETHYL-M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
12.96	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	622-79-7
13.31	1-NONENE	126	C9H18	124-11-8
14.07	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.48	.ALPHA.-PINENE,	136	C10H16	80-56-8
17.82	CAMPHENE	136	C10H16	79-92-5
22.25	1-OCTENE, 3,7-DIMETHYL-	140	C10H20	4987-01-4
25.04	L-LIMONENE - CYCLOHEXENE, 1-METHYL-4-(1	136	C10H16	470-82-6
25.38	1,8-CINEOLE - 2-OXABICYCLO[2.2.2]OCTANE	154	C10H18O	766-97-2
25.99	BENZENE, 1-ETHYNYL-4-METHYL-	116	C9H8	111-66-0
34.61	CAMPHOR - BICYCLO[2.2.1]HEPTAN-2-ONE, 1	152	C10H16O	76-22-2
37.13	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3

Tableau 15 : Composition détaillée de la fumée de végétation – E1

Au regard des effectifs par catégorie, la fumée contient 2 composés majoritaires dérivés du butane, 5 composés en quantité modérée qui sont des dérivés benzéniques et 4 composés minoritaires variés. Le reste correspond à des éléments traces, mais bien identifiés.

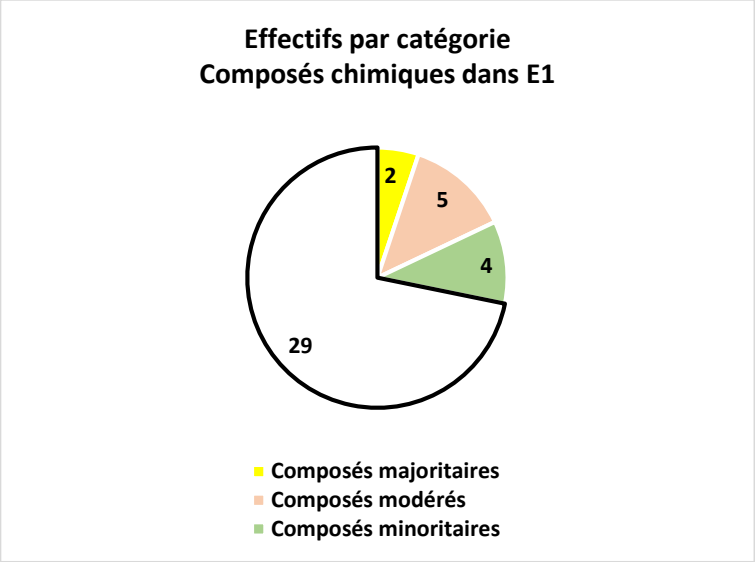


Fig. 23 : Effectifs des catégories de composés dans la fumée initiale (E1)

Ces 40 molécules appartiennent essentiellement à 3 classes de familles chimiques : les alcènes linéaires et cycliques, les composés cycliques aromatiques et terpènes ainsi que les hydrocarbures cycliques et aromatiques. Leur répartition dans la fumée est précisée ci-dessous.

FAMILLE DE PRODUITS CHIMIQUES	EFFECTIFS DANS E1
Alcènes linéaires et cycliques	17
Composés cycliques aromatiques et terpènes	**15**
Hydrocarbures linéaires cycliques et aromatiques	6
Aldéhydes	2

Tableau 16 : Familles de produits chimiques contenus dans la fumée – E1

La composition de la fumée reste constante d'un essai à l'autre, à quelques éléments traces près.

3-1-4-2 Fumée dans E2 après aspiration au travers du textile beige monocouche

Les spectres chromatographiques obtenus en présence du textile beige sont présentés ci-après.

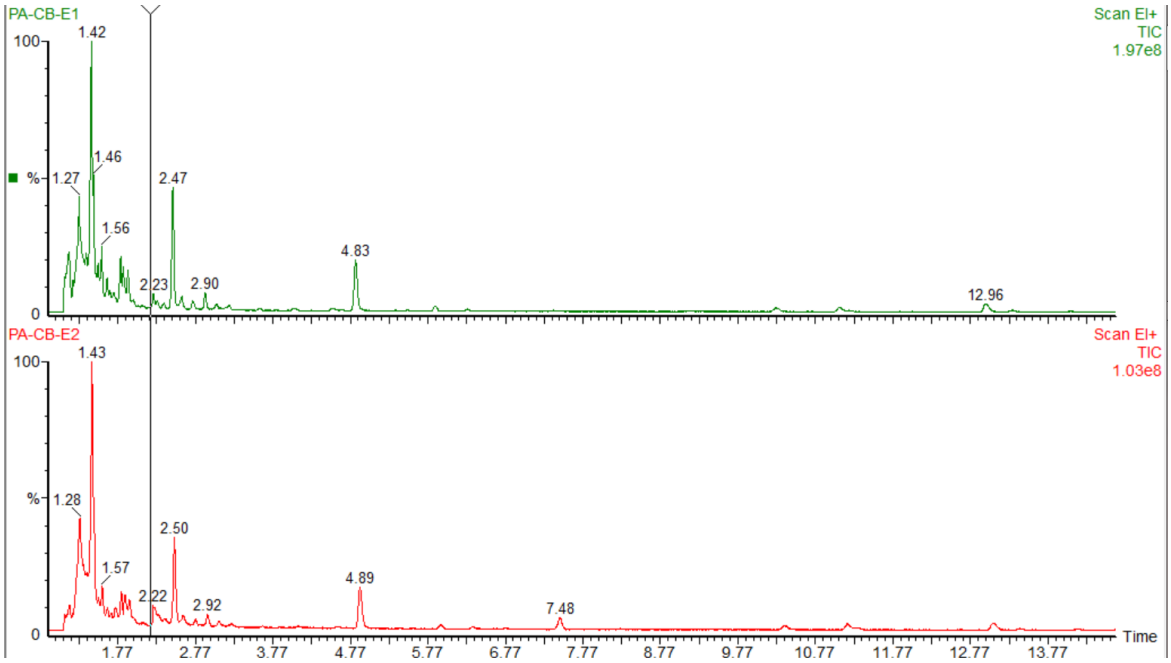


Fig. 24 : Chromatogrammes E1 et E2 avec textile beige monocouche

L'intensité globale du chromatogramme obtenu dans E1 atteint $1.97.10^8$ contre $1.03\ 10^8$ pour E2. La différence ramenée en %, traduit une baisse d'intensité de **47.7%** entre les deux compartiments.

Dans l'enceinte E2, le nombre de composés identifiés est **de 33 au lieu de 40** (soit **82.5%** de transfert entre les deux enceintes). Le détail des produits transférés vers E2 est précisé ci-dessous.

Temps de rétention s	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.15	CARBON DIOXIDE	44	CO2	124-38-9
1.28	1,3-BUTADIENE	54	C4H6	106-99-0
1.43	BUTANE,N-	58	C4H10	106-97-8
1.51	1,3-PENTADIENE, (E)-	68	C5H8	2004-70-8
1.57	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.63	CYCLOPENTENE	68	C5H8	142-29-0
1.68	PROPANAL, 2-METHYL-	72	C4H8O	78-84-2
1.81	1-PENTENE, 2-METHYL-	84	C6H12	763-29-1
1.92	FURAN, 2-METHYL-	82	C5H6O	534-22-5
2.22	ACETIC ACID	60	C2H4O2	64-19-7
2.50	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.61	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.77	CYCLOHEXENE	82	C6H10	110-83-8
2.92	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
3.07	HEPTANE	100	C7H16	142-82-5
3.24	FURAN, 2,5-DIMETHYL-	96	C6H8O	625-86-5
4.89	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.57	1,5-HEXADIENE	82	C6H10	592-42-7
5.93	1-OCTENE	112	C8H16	111-66-0

Temps de rétention s	Nom chimique du composé (suite)	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
6.35	OCTANE	114	C8H18	111-65-9
7.48	CYCLOTRISILOXANE, HEXAMETHYL-	222	C6H18O3Si3	541-05-9
10.37	BENZENE, ETHYL-	106	C8H10	100-41-4
11.18	BENZENE, 1,4-DIMETHYL- P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.23	BENZENE, 1,3-DIMETHYL- M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
13.06	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	622-79-7
13.40	1-NONENE	126	C9H18	124-11-8
14.17	NONANE	128	C9H20	111-84-2
16.55	.ALPHA.-PINENE,	136	C10H16	80-56-8
17.89	CAMPHENE	136	C10H16	79-92-5
25.06	L-LIMONENE	136	C10H16	5989-54-8
32.00	NONANAL	142	C9H18O	124-19-6
34.63	CAMPHOR	152	C10H16O	76-22-2
37.12	NAPHTHALENE	128	C10H8	91-20-3

Tableau 17 : Composition des gaz transférés dans E2 au travers du textile beige

Ces résultats indiquent que le textile beige laisse passer la majorité des composés chimiques contenus dans la fumée, même les éléments traces.

3-1-4-3 Fumée dans E2 après aspiration au travers de l'assemblage beige/gris

Les spectres chromatographiques en présence de l'assemblage beige/gris sont présentés ci-dessous.

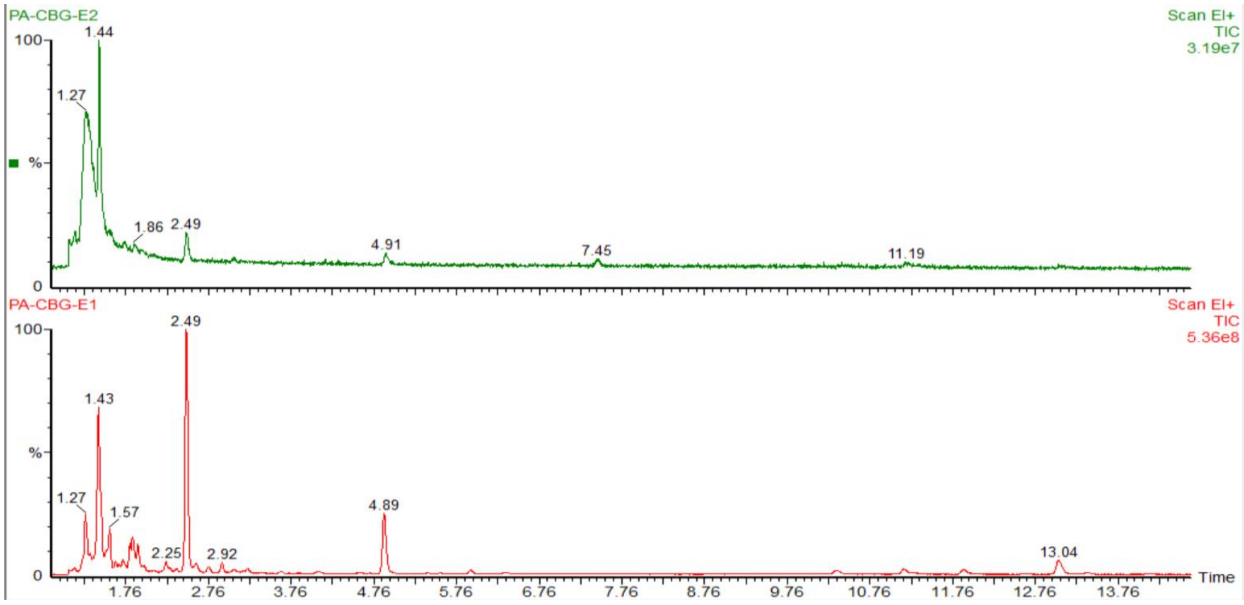


Fig. 25 : Chromatogrammes E1 et E2 avec assemblage beige/gris

La comparaison de l'intensité des chromatogrammes montre une nette diminution entre E1 et E2. En effet, avec 5.36 10^8 dans E1 et 0.319 10^8 dans E2, la baisse d'intensité atteint **94%**, soit près du double comparé au textile beige monocouche. Cette baisse d'intensité des pics s'accompagne également d'une réduction de **90%** du nombre de produits chimiques retrouvés dans E2, avec seulement **4 composés chimiques** au lieu de 40 identifié dans E2. Ces 4 produits correspondent aux pics majoritaires et modérés contenus dans E1.

Temps de rétention s	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.28	1,3-BUTADIENE	54	C4H6	106-99-0
1.43	BUTANE,N-	58	C4H10	106-97-8
2.50	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
4.89	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3

Tableau 19 : Composition des gaz transférés dans E2 au travers de l'assemblage beige/gris

En définitive, la présence du textile gris rajouté en doublure sous le textile beige conduit à une diminution de 90% des composés chimiques aspirés dans la fumée de végétation. Seuls les composés initialement les plus concentrés parviennent à traverser l'échantillon.

3-1-4-4 Fumée dans E2 après aspiration au travers du textile rouge

La fumée dense est maintenant aspirée au travers du textile rouge utilisé en monocouche. Les chromatogrammes obtenus montrent une baisse globale d'intensité entre E1 et E2 estimée à **66%** (4.66 10^8 pour E1 et 1.58 10^8 pour E2). Ce résultat semble indiquer que le textile rouge est moins « respirant » que le beige dont la baisse d'intensité était précédemment de **48%**.

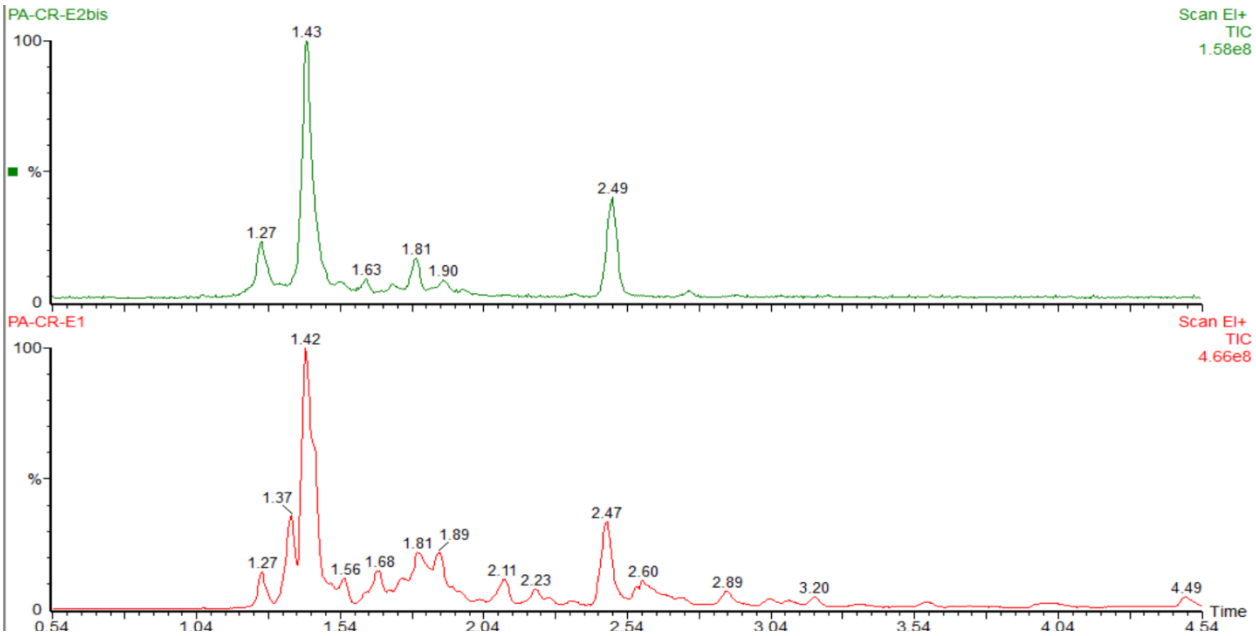


Fig. 26 : Chromatogrammes E1 et E2 avec textile rouge

La comparaison des composés chimiques entre les deux compartiments montre que seuls **15 composés** sur **40** parviennent à traverser ce textile, soit une baisse de **62.5%** du nombre de produits. Leur liste est donnée ci-dessous. Les 25 composés non retrouvés appartiennent à la catégorie des éléments traces.

Temps de rétention s	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.28	1,3-BUTADIENE	54	C4H6	106-99-0
1.42	BUTANE,N-	58	C4H10	106-97-8
1.46	1,3-BUTADIENE, 2-METHYL-	68	C5H8	78-79-5
1.63	CYCLOPENTENE	68	C5H8	142-29-0
1.81	1-PENTENE, 2-METHYL-	84	C6H12	763-29-1
1.89	FURAN, 2-METHYL-	82	C5H6O	534-22-5
2.47	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.89	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
4.49	PYRROLE	67	C4H5N	109-97-7
4.83	BENZENE, METHYL- TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
10.27	BENZENE, ETHYL-	106	C8H10	100-41-4
11.11	BENZENE, 1,4-DIMETHYL- P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
11.22	BENZENE, 1,3-DIMETHYL-M-XYLENE	106	C8H10	108-38-3
16.47	.ALPHA.-PINENE,	136	C10H16	80-56-8
25.06	L-LIMONENE	136	C10H16	5989-54-8

Tableau 20 : Composition des gaz transférés dans E2 au travers du textile rouge

3-1-4-5 Fumée dans E2 après aspiration au travers de l'assemblage rouge/gris

L'assemblage rouge/gris, entraîne une forte diminution de l'intensité globale des chromatogrammes, avec 114 10^7 pour E1 et 2.0 10^7 pour E2, soit une baisse de **98%.**

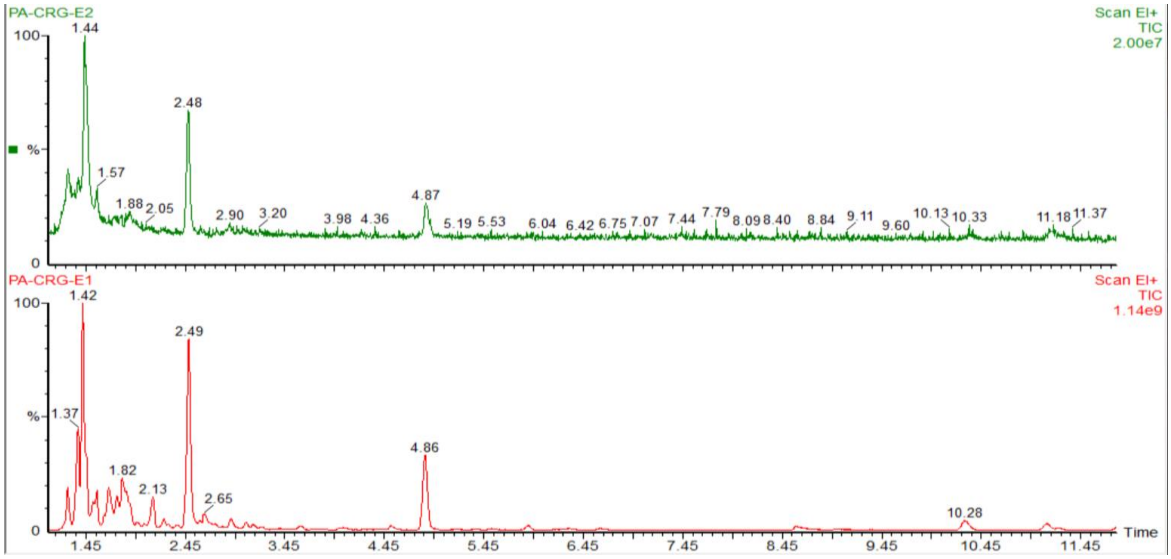


Fig. 27 : Chromatogrammes E1 et E2 avec assemblage rouge/gris

Les 5 composés chimiques qui traversent cet assemblage sont lités ci-dessous. Ils appartiennent aux produits de la catégorie majoritaire et modérée présents dans la fumée initiale.

Temps de rétention s	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.28	1,3-BUTADIENE	54	C4H6	106-99-0
1.42	BUTANE,N-	58	C4H10	106-97-8
1.57	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
2.49	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
4.86	TOLUENE	92	C7H8	108-88-3

Tableau 21 : Composition des gaz transférés dans E2 au travers de l'assemblage rouge/gris

En définitive, l'ajout du textile gris comme doublure du textile rouge permet à nouveau de diminuer de **87.5%** le nombre de produits potentiellement inhalés.

3-1-4-6 Fumée dans E2 après aspiration au travers de l'assemblage rouge/filtre charbon

Le textile rouge est ici associé au filtre charbon du masque de protection respiratoire. L'intensité globale des spectres montre également une atténuation importante des pics avec **87.9%** de baisse d'intensité (44.9 10^7 pour E1 et 5.45 10^7).

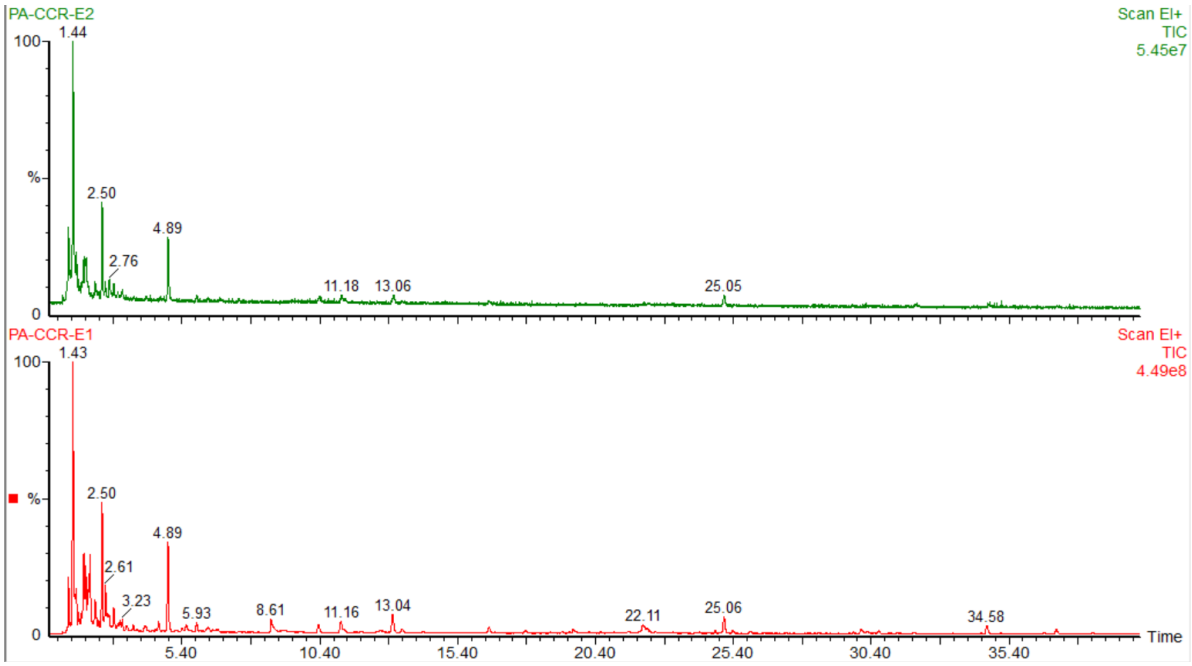


Fig. 28 : Chromatogrammes E1 et E2 avec assemblage rouge/filtre charbon

Après analyse, **17** composés sur 40 sont identités dans E2, soit une baisse de **57.5%** comparé à E1. Leur liste est précisée ci-dessous.

Temps de rétention s	Nom chimique du composé	Masse molaire	Formule brute	N° CAS
1.27	CARBON DIOXIDE	44	CO2	124-38-9
1.42	BUTANE,N-	58	C4H10	106-97-8
1.46	1,3-BUTADIENE, 2-METHYL-	68	C5H8	78-79-5
1.56	1,3-CYCLOPENTADIENE	66	C5H6	542-92-7
1.68	PROPANAL, 2-METHYL-	72	C4H8O	78-84-2
1.81	1-PENTENE, 2-METHYL-	84	C6H12	763-29-1
1.89	FURAN, 2-METHYL-	82	C5H6O	534-22-5
2.25	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.50	BENZENE	78	C6H6	71-43-2
2.61	1,3-CYCLOHEXADIENE	80	C6H8	592-57-4
2.92	1-HEPTENE	98	C7H14	592-76-7
4.89	BENZENE, METHYL- TOLUENE	92	C7H8	108-88-3
5.93	1-OCTENE CAPRYLENE	112	C8H16	111-66-0
10.35	BENZENE, ETHYL-	106	C8H10	100-41-4
11.16	BENZENE, 1,4-DIMETHYL- P-XYLENE	106	C8H10	106-42-3
13.04	BENZENE, (AZIDOMETHYL)-	133	C7H7N3	124-11-8
25.06	L-LIMONENE	136	C10H16	5989-54-8

Tableau 22 : Composition des gaz transférés dans E2 au travers de l'assemblage rouge/filtre charbon

En présence du filtre à charbon, le nombre de composés chimiques dans E2 baisse seulement de **57.5%** contre **88 à 90%** avec le textile gris.

Récapitulatif :

Le pourcentage de baisse d'intensité globale des pics ainsi que celui des composés chimiques est rassemblé ci-dessous pour chaque échantillon testé.

Echantillons	% Baisse intensité globale pics	% baisse des composés chimiques
Textile beige	48	15
Textile beige/gris	93	90
Textile rouge	67	63
Textile rouge/gris	98	88
Textile rouge/charbon	88	58

Tableau 23 : Récapitulatif de la baisse d'intensité et celle des composés chimiques

Ces résultats sont représentés dans l'histogramme ci-après.

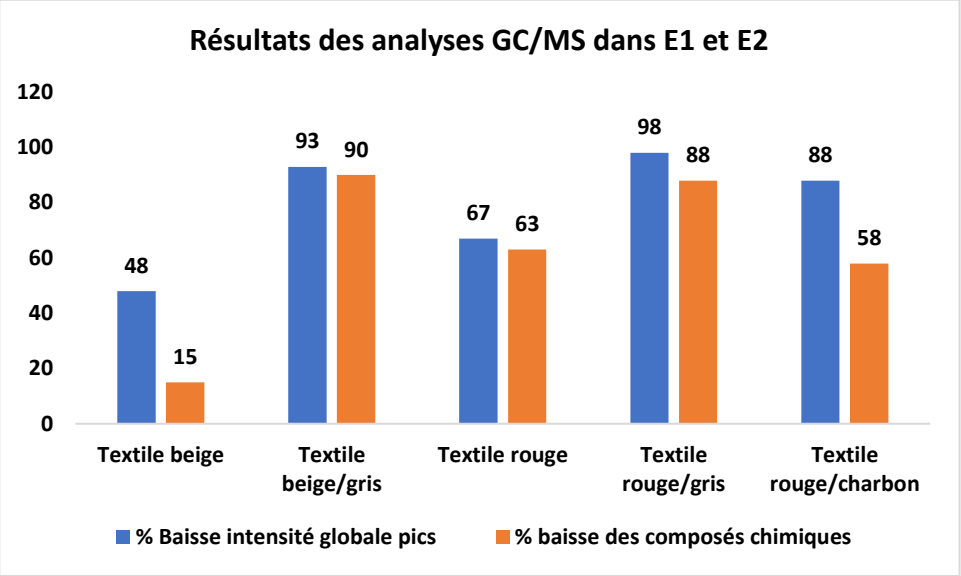


Fig. 29 : Récapitulatif des résultats GC/MS – % de baisse d'intensité et de composition chimique

<u>Récapitulatif :</u>

Il est possible d'établir un classement des textiles en fonction de leur capacité à diminuer l'intensité des pics. Dans l'ordre croissant des intensités il y a :

Textile beige < Textile rouge < textile rouge/charbon < textile beige/gris ≈ textile rouge/gris

Dans l'ordre croissant de la baisse du nombre de produits, il y a :

Textile beige < Textile rouge/charbon < textile rouge < textile rouge/gris ≈ textile beige/gris

Les textiles monocouches utilisés avec la doublure grise donnent des résultats assez proches et performants. En effet, ils apparaissent les plus efficaces en termes de baisse d'intensité et de diminution des produits potentiellement inhalés.

Vient ensuite l'assemblage filtre à charbon associé au textile rouge qui procure davantage une baisse d'intensité qu'une diminution du nombre de produit chimiques potentiellement inhalés.

Enfin notons que le textile rouge monocouche est moins « perméable » que le beige ce favorise globalement la baisse des intensités et celle du nombre de produits retrouvés dans E2.

3-2 Tests passifs

Le dispositif mis en œuvre dans le cadre des tests passifs vise à placer les assemblages textiles dans une fumée dense en l'absence d'aspiration afin de mesurer le transfert passif des particules fines et ultrafines au travers des textiles.

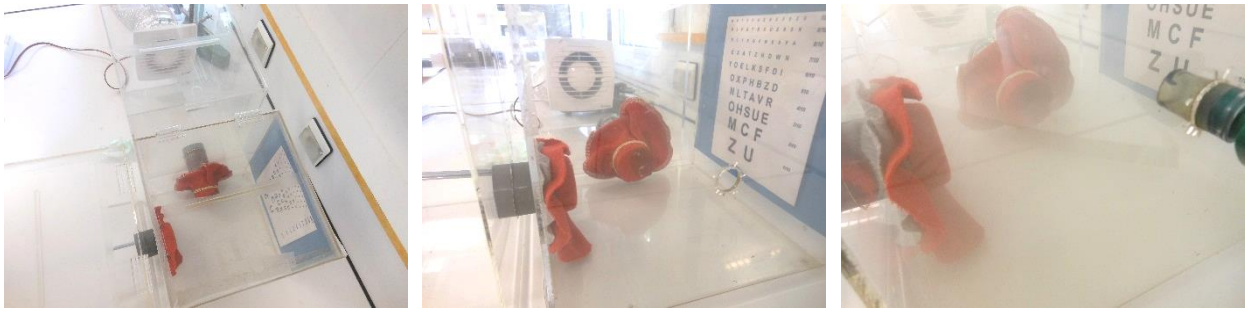


Fig. 30 : Photos du dispositif de test passif

L'enceinte E1 raccordée à la chambre de combustion est enfumée grâce à l'aspiration créée par l'extracteur de l'enceinte E2. Lorsque la densité de la fumée devient importante dans E1, la ventilation est arrêtée. Les mesures de particules fines et ultrafines sont alors réalisées dans l'enceinte E3. La prise de mesure s'effectue juste derrière l'assemblage des textiles exposés à la fumée. L'assemblage rouge/filtre charbon n'est pas testé dans la mesure où il est utilisé uniquement de manière active en présence d'une respiration.

3-2-1 Résultats des textiles monocouches rouge et beige

3-2-1-1 Particules fines

Les mesures de particules fines sur les deux textiles monocouche rouge et beige indiquent que les concentrations entre la face exposée et la face arrière du textile se mettent en équilibre en quelques secondes.

Tailles de particules fines µm	Textile rouge face exposée	Textile rouge face arrière	Textile rouge face exposée	Textile rouge face arrière
PM10	> 400	> 400	> 400	> 400
PM4	> 400	> 400	> 400	> 400
PM2.5	> 400	> 400	> 400	> 400
PM1	> 400	> 400	> 400	> 400

Tableau 24 : Mesures des particules fines diffusées passivement au travers des textiles monocouches

En effet, les valeurs atteignent le seuil de saturation de 400 mg/m^3 de part et d'autre des textiles rouge et beige utilisés en monocouche, ce qui démontrent leur incapacité à filtrer les particules fines contenue dans la fumée.

3-2-1-2 Particules ultrafines

Il en va de même pour les particules ultrafines, où les concentrations mesurées dans E3 et dans E1 sont **supérieures ou égales à 500 000 pt/cm^3** (saturation de l'appareil).

3-2-2 Résultats des assemblages rouge/gris et beige/gris

3-2-2-1 Particules fines

En présence du textile gris utilisé en doublure, les concentrations en particules fines mesurés à l'arrière des assemblages sont très faibles comparées à celle de la face exposée à la fumée. Les tableaux ci-dessous donnent les résultats obtenus pour les deux types d'assemblage.

ASSEMBLAGE ROUGE/GRIS					
Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	> 400	0.191	2094	0.048
	4		0.179	2235	0.045
	2.5		0.173	2312	0.043
	1		0.186	2151	0.047
Moyenne				**2198**	**0.046**

ASSEMBLAGE BEIGE/GRIS					
Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	> 400	0.150	2667	0.038
	4		0.155	2581	0.039
	2.5		0.145	2759	0.036
	1		0.161	2484	0.040
Moyenne				**2623**	**0.038**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	> 400	0.100	4000	0.025
	4		0.108	3704	0.027
	2.5		0.107	3738	0.027
	1		0.115	3478	0.029
Moyenne				**3730**	**0.027**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	> 400	0.163	2454	0.041
	4		0.167	2395	0.042
	2.5		0.153	2614	0.038
	1		0.164	2439	0.041
Moyenne				**2476**	**0.041**

Tableau 25 : Mesures des particules fines diffusées passivement au travers des assemblages rouge/gris et beige/gris

Le rapport entre les concentrations de E1 et E3 est équivalent pour les deux assemblages et varie au minimum entre **2198 et 3730.** Avec des concentrations dans E2 inférieures à **0.2 mg/m^3** à l'arrière des assemblages et quelle que soit la taille considérée, le pourcentage de particule qui traverse passivement ces assemblages est en moyenne de **0.037 et 0.040%** pour les assemblages rouge/gris et beige/gris respectivement. Ceci indique que **99.96**% des particules de 10 et 1 µm sont bloquées passivement par la doublure grise.

3-2-2-2 Particules ultrafines

L'appareil est réglé pour donner une valeur moyenne de concentration en particules ultrafines toutes les 10 secondes, pendant 5 minutes.

Dans l'enceinte E1, la concentration en particules ultrafines est toujours supérieure ou égale à 500 000 pt/cm^3 (saturation de l'appareil). Dans l'enceinte E3, les concentrations mesurées à l'arrière des assemblages sont exposées ci-dessous.

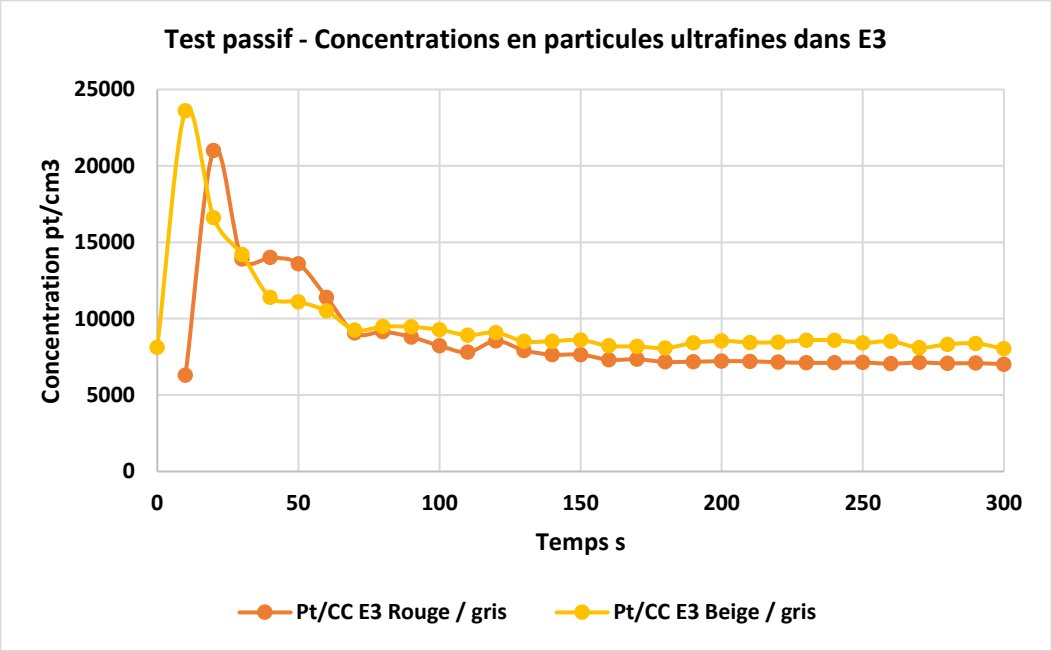


Fig. 31 : Evolution des concentrations en particules ultrafines en fonction du temps – Test passif

Le comportement des assemblages de textile rouge/gris et beige/gris est globalement similaire. Les cinétiques montrent que la concentration maximale en particules ultrafines est relevée dans les 10 premières secondes d'exposition avec une valeur moyenne de 23600 et 21000 pour les textiles rouge/gris et beige/gris respectivement. Elles décroissent ensuite rapidement au bout d'une minute pour passer en dessous des 100 000 pt/cm^3. Entre 1 et 5 minutes, les concentrations continuent de baisser pour se stabiliser vers 3 minutes.

Ces résultats montrent qu'en contact avec une fumée dense et en absence d'aspiration, la présence du textile gris intercepte efficacement les particules ultrafines.

Par ailleurs, la somme des concentrations en particules ultrafines ayant traversé les différents textiles pendant 5 minutes est représentée ci-dessous.

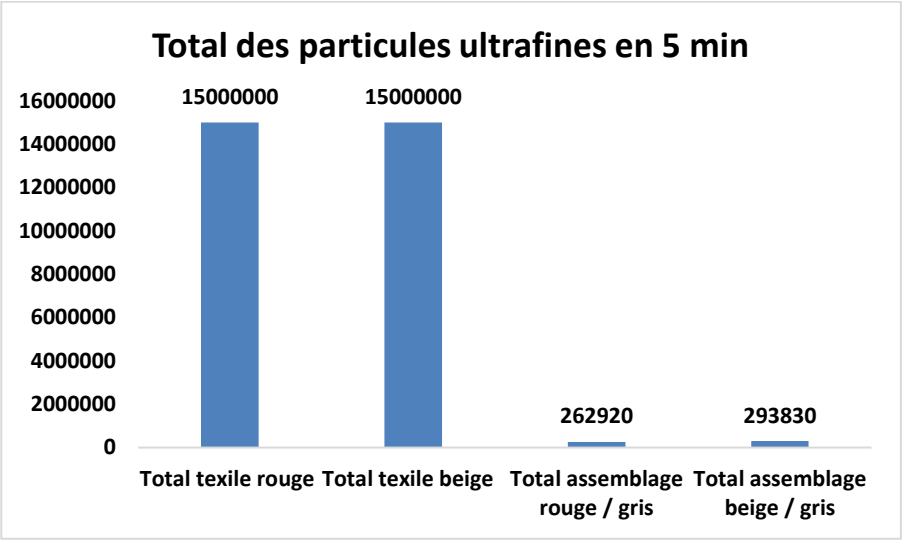


Fig. 32 : Somme des concentrations en particules ultrafines selon les textiles – Tests passifs

Comparé à la concentration de saturation de 500 000 mesurée avec les textiles monocouches, le textile gris permet de réduire de **95.3 et 95.8%** la concentration en particules ultrafines pénétrant passivement les textiles et se retrouvant potentiellement en contact avec la peau.

Une deuxième série d'essai est réalisée en procédant à un deuxième enfumage, 2 minutes après le premier. Les résultats sont présentés graphiquement ci-dessous.

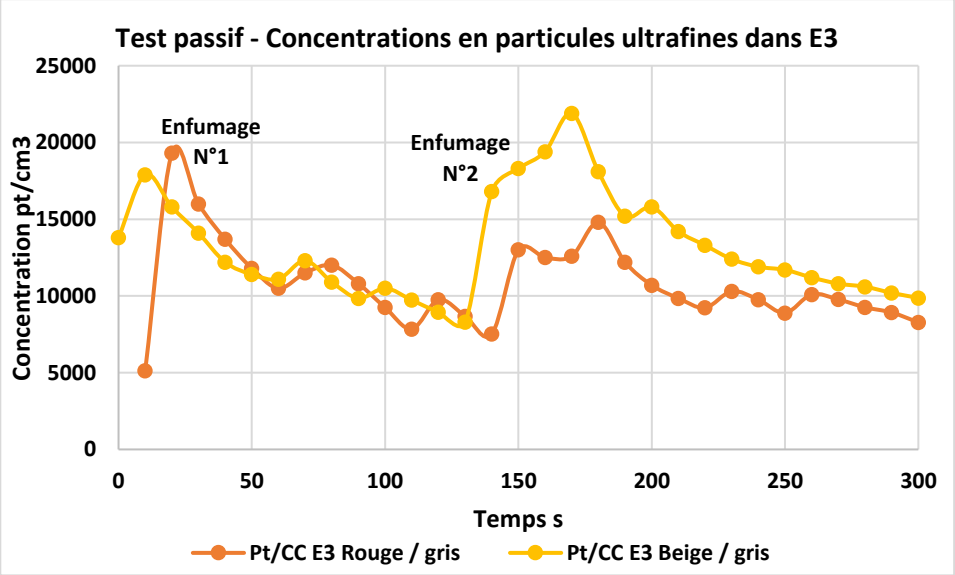


Fig. 33 : Evolution des concentrations en particules ultrafines en fonction du temps – Test passif 2 enfumages

A nouveau, les deux enfumages se traduisent par un pic de particules ultrafines passant au travers des assemblages, puis une diminution rapide des concentrations après 1 minute d'exposition. La

La somme des particules ultrafines ayant traversé les textiles pendant 5 minutes est représentée ci-dessous.

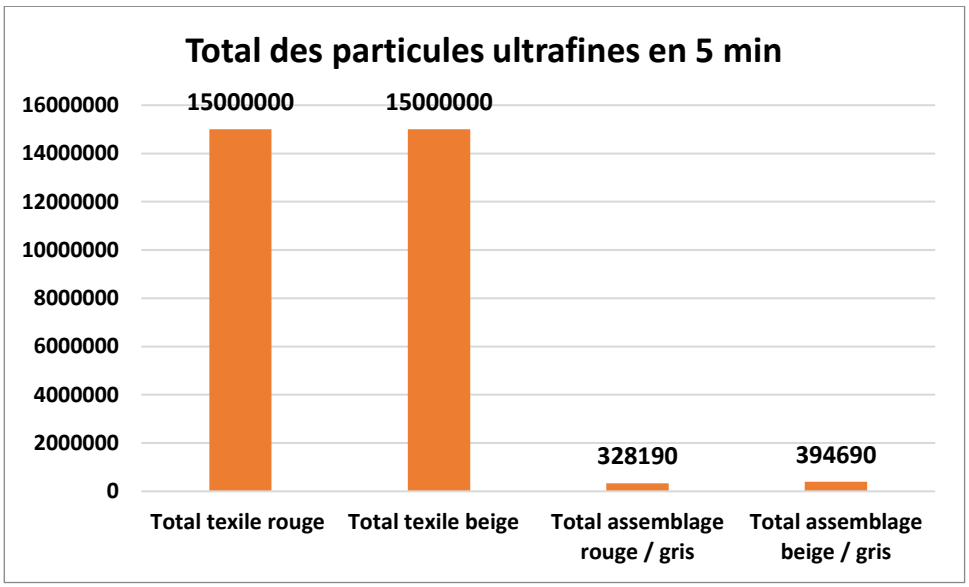


Fig. 34 : Somme des concentrations en particules ultrafines selon les textiles – Tests passifs deux enfumages

Le textile gris rajouté en doublure sous le textile rouge et beige permet de diminuer à nouveau de **97.8 et 97.4%** les concentrations en particules ultrafines pénétrant passivement les textiles et se retrouvant potentiellement en contact avec la peau.

<u>Récapitulatif des tests passifs :</u>

En absence de toute aspiration, les textiles rouge et beige utilisés en monocouche laisse passer la totalité des particules fines et ultrafines contenues dans la fumée. Au contraire, le textile gris rajouté en doublure permet de stopper 100% des particules fines comprises entre 1 et 10 microns, et plus de **98%** des particules ultrafines. Une élévation de la température des fumées pourrait éventuellement réduire légèrement la filtration des particules ultrafines.

3-3 Test global sur support facial

3-3-1 Essai N°1- Test global

Une tête de mannequin servant de support est préalablement percée de part en part pour y installer un tuyau pvc de diamètre 45 mm de façon à mesurer les particules aspirées sous la cagoule, au niveau de la bouche.

Les prototypes de cagoule sont testés dans leur globalité selon le dispositif présenté Fig.17, du paragraphe 2-3-4. La cagoule est ajustée sur la face afin à la rendre parfaitement étanche grâce à du ruban adhésif collé au niveau du visage et sur les bandes auto agrippantes.

Fig. 35 : Préparation et ajustage de la cagoule sur la tête de mannequin perforé

Le support facial ainsi revêtu est installé dans l'enceinte E1, puis raccordée à E2. Dans les conditions du test, la vitesse de l'air aspiré au niveau de la bouche est de **1.9 m/s**, soit un débit de **181 l/min**.

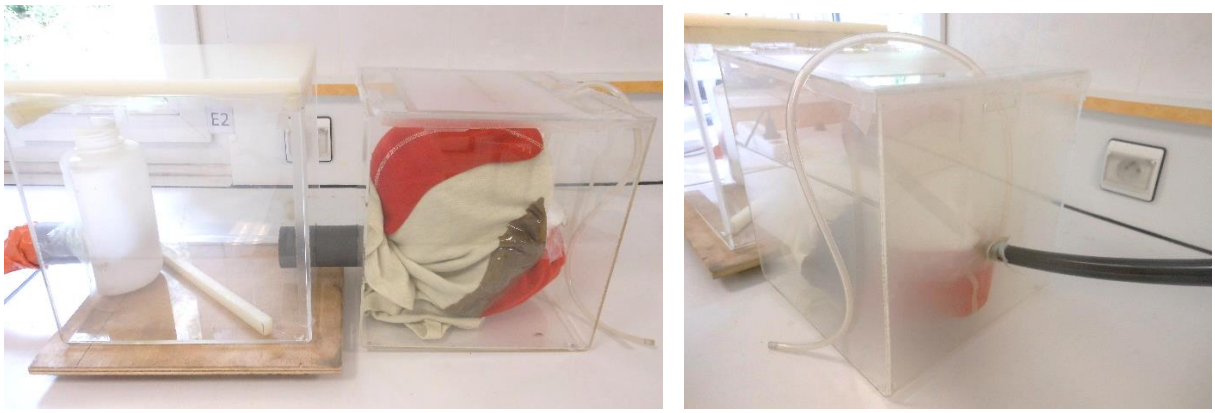


Fig. 36 : Dispositif de test global sur support facial – Essai 1

Ce dispositif permet de réaliser des tests actifs et passifs en parallèle, en analysant les particules fines et ultrafines dans E2 et E1 sous la cagoule.

- **Particules ultrafines :**

Les mesures de particules ultrafines réalisées dans E1 sous la cagoule et dans E2 sont rassemblées ci-dessous.

Essai N°1	Essai passif	Essai sous aspiration
Localisation du prélèvement	**E1 sous la cagoule : Textile beige/gris**	**E2 - Textile rouge/gris**
Concentration Pt/cc	**≥ 500 000**	**≥ 500 000**

Tableau 26 : Mesures des particules ultrafines diffusées au travers de la cagoule – Essai global sur support facial

Toutes les concentrations en particules ultrafines sont supérieures ou égales à 500 000 pt/cc, que ce soit en passif ou en actif. La cagoule entourée d'une fumée dense ne permet pas de filtrer efficacement les particules ultrafines présentes dans la fumée.

Ce résultat s'explique par la présence du textile rouge en monocouche, situé sur le haut de la tête qui favorise l'entrée et la diffusion des particules fines et ultrafines sous la cagoule.

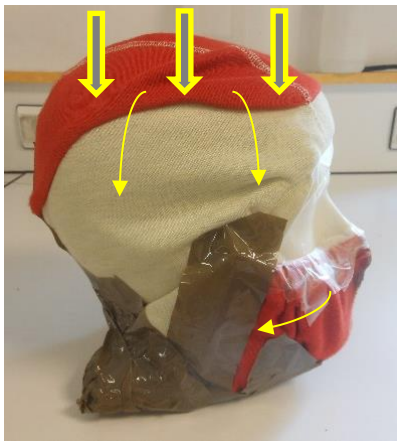


Fig. 37 : Mode de diffusion des contaminants par le textile rouge monocouche sur le haut du crâne

Pour estimer réellement les concentrations en particules fines et ultrafines aspirées par la bouche, ainsi que celles diffusées sous la cagoule, le dispositif est modifié en conséquence.

3-3-2 Essai N°2- Test passif sur support facial

Dans cet essai, la cagoule entièrement refermée sur la tête du mannequin est placée dans l'enceinte E1. Les mesures de particules fines et ultrafines sont réalisées sous la cagoule au niveau du textile beige/gris, situé sur la tempe, grâce à une tubulure qui rejoint l'appareil de mesure.

Fig. 38 : Mesures des particules fines et ultrafines en diffusion passive sur support facial

Les mesures sont réalisées après enfumage et arrêt de toute ventilation. Avec une fumée dense et opaque, la concentration en particules fines et ultrafines dans l'enceinte E1 est systématiquement au-dessus des seuils de saturation des appareils. Le tableau suivant présente les résultats de trois mesures différentes réalisées sous la cagoule, avec purge totale du dispositif entre chaque essai.

Tailles de particules fines	Concentration mg/m³ sous la cagoule textile beige/gris			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
PM10	66.6	104	71.6	**81**
PM4	43.5	65.4	58.8	**56**
PM2.5	50.2	51.8	53.5	**52**
PM1	56.6	62.9	47.6	**56**
Ultrafines	> 500 000	> 500 000	> 500 000	**> 500 000**

Tableau 27 : Mesures des particules fines diffusées passivement au travers de la cagoule – Essai global sur support facial

En absence d'aspiration, les particules fines parviennent à traverser partiellement la cagoule de protection. Les concentrations sous les textiles sont cependant nettement diminuées comparée à celles contenues dans la fumée dense. Le ratio concentration des particules fines dans la fumée dense et sous la cagoule est au minium de **5 à 8**, en considérant une valeur de 400 mg/m³ dans E1.

A contraire, les concentrations en particules ultrafines sous la cagoule restent supérieures ou égale au seuil de saturation de l'appareil. Ces dernières traversent aisément le textile rouge et se diffusent entièrement sous la cagoule.

3-3-3 Essai N°3 : Test actif sous aspiration

Dans cet essai, la tête du mannequin équipé de la cagoule est placée en dehors de la fumée entre les enceintes E1 et E2. Seule la partie située au niveau de la bouche est introduite dans l'enceinte

E1 et raccordée directement à E2. L'étanchéité de l'aspiration au niveau de la bouche est assurée par l'ajout d'un joint torique pinçant le textile sur le tuyau d'aspiration.

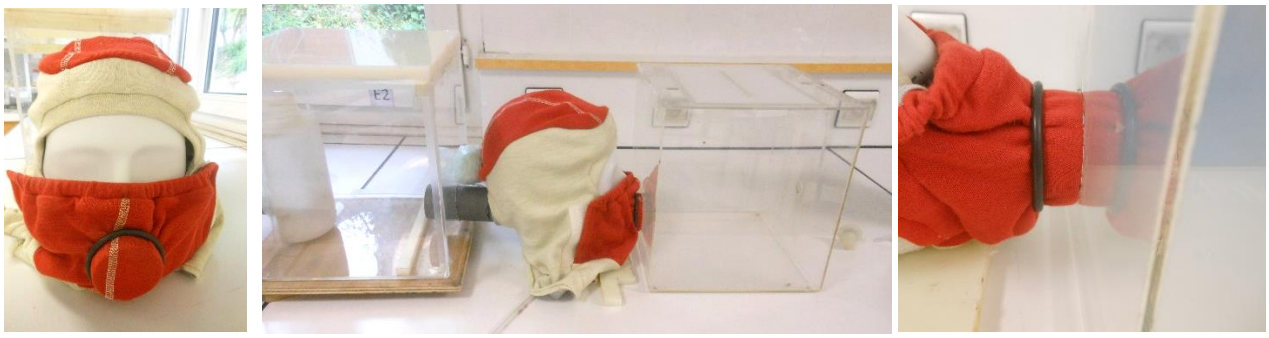


Fig. 39 : Test actifs d'aspiration sur support facial – Essai 3

- **Résultat du test actif sur support facial - Particules fines :**

La fumée de E1 est toujours dense avec des concentrations supérieures à 400 mg/m^3. L'aspiration de cette fumée au niveau de la bouche montre une bonne filtration des particules fines et confirme à nouveau la saturation des textiles observées précédemment. Les tableaux ci-dessous rassemblent les résultats obtenus sur 4 essais consécutifs.

ASSEMBLAGE ROUGE/GRIS CAGOULE COMPLETE					
Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	1500	5.20	289	0.347
	4		6.36	236	0.424
	2.5		6.48	232	0.432
	1		6.30	238	0.420
Moyenne				**249**	**0.406**

ASSEMBLAGE ROUGE/GRIS CAGOULE COMPLETE					
Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	700	0.290	2397	0.041
	4		0.196	3571	0.028
	2.5		0.435	1609	0.062
	1		0.450	1552	0.064
Moyenne				**2283**	**0.049**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	297	0.260	1142	0.088
	4	300	0.154	1948	0.051
	2.5	295	0.104	2837	0.035
	1	210	0.100	2211	0.048
Moyenne				**2035**	**0.056**

Temps d'aspiration s	Taille particules µm	E1 mg/m^3	E3 mg/m^3	RAPPORT E1/E2	%
10	10	600	0.100	5172	0.017
	4		0.108	5505	0.018
	2.5		0.107	5128	0.018
	1		0.115	5217	0.019
Moyenne				**5256**	**0.018**

Tableau 28 : Mesures des particules fines aspirées au travers de la cagoule – Essai global sur support facial

Le pourcentage de particules fines traversant la cagoule au niveau buccal, varie de **0.406 à 0.018 %.** Lors des essais, le phénomène de saturation du textile gris se traduit par une baisse rapide des débits d'aspiration au fur et à mesure de l'aspiration de la fumée.

- **Test actif sur support facial - particules ultrafines :**

En ce qui concerne les particules ultrafines, les résultats montrent également leur bonne filtration au niveau de la bouche.

En effet, les mesures réalisées dans l'enceinte E2 après 1 min d'aspiration (T_1) donnent des concentrations moyennes très faibles et proches de l'ambiante. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus

Mesures	E1	E2 T_0	E2 T_1	Ecart
1	**≥ 500 000**	3100	3500	400
2		9600	10000	400
3		3590	4480	890
4		3340	3400	60
5		4200	4500	300

Tableau 29 : Mesures des particules ultrafines aspirées au travers de la cagoule – Essai global sur support facial

Les particules ultrafines sont donc efficacement filtrées par au travers du textile rouge/gris de la cagoule.

Les essais réalisés sur le prototype N°2 en présence du filtre à charbon donne des résultats équivalents d'un point de vue passif tandis que la filtration active au niveau de la bouche s'apparente aux résultats trouvés au paragraphe 3-1-3 en présence de l'assemblage rouge/charbon actif.

Récapitulatif :

La cagoule complète exposée à une fumée dense et sans aspiration, laisse passer partiellement les particules fines et totalement les particules ultrafines qui pénètrent au niveau du textile rouge monocouche situé sur le haut du crâne. Ces contaminants qui sont aussi accompagnés par les gaz et les composés chimiques contenus dans la fumée, se répandent sous la cagoule et rentrent en contact avec la peau.

En conditions de terrain, la cagoule est portée sous un casque et avec un masque de protection pour les yeux. Il conviendra de vérifier en conditions d'utilisation réelle, les parties de la cagoule réellement exposées aux fumées ainsi que toutes les sources d'entrée potentielle des contaminants. En effet, l'efficacité du textile gris filtrant repose entièrement sur l'étanchéité de la cagoule.

Il conviendra également d'évaluer en condition d'utilisation, la respirabilité de ces cagoules et leur tolérance physiologique pour les personnels équipés.

Fig. 40 : Conditions opérationnelles d'utilisation de la cagoule

4- CONCLUSIONS

L'efficacité de la protection des cagoules feux de forêts vis-à-vis des fumées de végétation est étudiée au laboratoire du CEREN grâce à la mise en œuvre de dispositifs spécifiques visant à se rapprocher des conditions d'utilisation. Les textiles sont soumis à des tests actifs sous aspiration qui reproduisent une respiration humaine au travers de la cagoule en condition d'efforts modérés et intenses. Des tests passifs sont également conduits de façon à étudier les autres parties de la cagoule, non soumis directement à la respiration.

Les échantillons livrés pour tests comprennent deux textiles monocouches de couleur rouge et beige, deux assemblages des mêmes textiles doublés par un textile gris ainsi qu'un assemblage textile rouge associé à un masque de protection à charbon actif. Ces éléments sont assemblés pour constituer deux prototypes de cagoule également livrés pour être testés dans leur globalité.

- **Les tests actifs conduits en condition d'aspiration modérée montrent que les textiles monocouches sont respirants tandis que le textile gris rajouté en doublure l'est beaucoup moins. En effet, Il faut augmenter l'aspiration entre 100 et 200 l/min pour assurer un passage suffisant de l'air au travers du textile gris.**

Par ailleurs, les essais d'aspiration actifs conduits en présence de fumée montrent que le textile gris se colmate rapidement. En effet, la demi-saturation est mesurée après 30 secondes et la saturation totale intervient après une minute d'aspiration. En comparaison, le filtre à charbon testé dans les mêmes conditions est davantage respirant avec une demi-saturation mesurée après 8 minutes. Cette faible respirabilité du textile gris et son colmatage rapide pose question quant à sa tolérance physiologique pour les utilisateurs.

Les performances de filtration des textiles sont étudiées vis-à-vis, des différents contaminants contenus dans les fumées.

En ce qui concerne les gaz toxiques, les résultats montrent le textile gris utilisé en doublure entraîne une baisse importante des concentrations en monoxyde de carbone, au contraire du filtre à charbon qui le laisse davantage passer. De plus, le formaldéhyde présent initialement dans la fumée disparait en présence du textile gris et du filtre à charbon, alors que le dosage de l'acroléine n'est pas suffisamment sensible pour permettre une conclusion.

L'analyse détaillée des composés chimiques contenus dans la fumée révèle que le textile gris assure une diminution du nombre et de la concentration des composés chimiques potentiellement inhalés. En effet, il procure une baisse de 88 à 90% du nombre de composés chimiques et 93 à 98% de baisse d'intensité des pics. En comparaison, le filtre à charbon diminue de 58% le nombre de composés chimiques et baisse de 88% leur intensité.

Le comportement des textiles vis-à-vis des particules fines et ultrafines montre que les échantillons monocouches laissent passer les particules fines et ultrafines. Le textile gris et le filtre à charbon intercepte 99% des particules fines. Pour les ultrafines, seul le textile gris assure une interception efficace tandis que le filtre à charbon en laisse passer une partie.

- **Lorsque les textiles sont exposés à la fumée en absence d'aspiration, les résultats indiquent que les textiles monocouches laissent à nouveau passer la totalité des particules fines et ultrafines contenues dans la fumée. Au contraire le textile gris rajouté en doublure permet de bloquer totalement l'entrée passive des particules fines et ultrafines.**

  Ce textile semble davantage convenir à une utilisation passive qu'active car il est bien étanche aux particules fines et ultrafines mais s'avère difficilement respirable pour une utilisation au niveau de la bouche.

- **En ce qui concerne les performances des prototypes soumis aux tests dans leur ensemble, il s'avère qu'ils sont peu filtrants vis-à-vis des particules fines et ultrafines. En effet, la présence d'un textile rouge monocouche cousu sur le dessus de la tête favorise l'entrée directe des contaminants et leur diffusion sous la**

cagoule annulant ainsi l'efficacité du textile gris utilisé en doublure sur le reste de la cagoule.

Les résultats confirment également la faible respirabilité de la cagoule au niveau de la bouche, mais sa protection efficace pour filtrer les particules fines et ultrafines.

En définitive, la conception de la cagoule devra tenir compte des conditions d'utilisation opérationnelles. Elle devra être compatible avec les autres EPI (casque lunettes, veste…). Sa tolérance physiologique et son étanchéité seront des points essentiels qui conditionneront son efficacité.

Des essais en situation réelle, réalisés sur l'intégralité des cagoules, constitueront la deuxième partie de cette étude.