

Étude épidémiologique rétrospective sur des salariés exposés à des poussières de composite carbone/carbone

Epidemiological results of a retrospective study in workers exposed to carbon/carbon particles

D. Martin^{a*}, I. Dufourt^b, E. Graf^c, M. Litzenger^d, J. Papin^e, P. Brochard^f

^a *Service de santé au travail, Snecma Propulsion Solide, Les Cinq-Chemins, 33187 Le Haillan cedex, France*

^b *Service de santé au travail, Messier-Bugatti, 7, avenue Bel-Air, 69627 Villeurbanne, France*

^c *Service de santé au travail, Messier-Bugatti, zone aéronautique Louis-Bréguet, BP 10, 78142 Vélizy cedex, France*

^d *Service de santé au travail, Messier-Bugatti, 1-9, rue Antoine-Saint-Exupéry, 67129 Molsheim, France*

^e *Direction du développement durable, Safran, 2, boulevard Général-Martial-Valin, 75724 Paris cedex 15, France*

^f *Service de médecine du Travail, groupe hospitalier Pellegrin, place Amélie-Raba-Léon, 33000 Bordeaux France*

Disponible en ligne sur

 **ScienceDirect**
www.sciencedirect.com

Summary

Objective. To test the hypothesis of a respiratory and cutaneous effect of the contact with carbon particles present in the sprays resulting from the manufacturing of industrial pieces in carbon/carbon composite.

Method. The bibliography shows that the carbon fibers used have a large aerodynamic diameter, which makes their human inhalation unlikely. Carbon particles are so far considered inert in the biological structures but few publications are available and the low level of precision concerning their conditions of realization “invalidate” the conclusions presented. That is why the Safran group chose, in 1999, to carry out a toxicological study backed by an exposed/non exposed cross-sectional study. Data recording covered the period of January 1st to December 31st, 2003, and concerned 523 subjects belonging to four companies of the group producing the carbon/carbon composite. Health effects were studied on one hand on the basis of the answers to a questionnaire, of a clinical examination, of the measurement of the flow-volume curve as a pulmonary function test (PTF) and by practicing a standard chest lung radiography. Exposure evaluation was performed using three different approaches (metrological, “expert” and “self-evaluation” of the subject). Statistical analysis was performed including all the data of the four sites, and taking into account the usual confusion factors and the

Résumé

Objectif. Tester l'hypothèse d'un effet respiratoire et cutanéomuqueux du contact avec des particules de carbone présentes dans les aérosols résultants de la fabrication de pièces industrielles en composite carbone/carbone.

Méthode. La bibliographie montre que les fibres de carbone utilisées ont un diamètre aérodynamique élevé rendant leur inhalation chez l'homme peu probable. Les particules de carbone sont jusqu'à présent réputées inertes dans les structures biologiques mais peu de publications sont disponibles et le faible niveau de précision concernant leurs conditions de réalisation « invalident » les conclusions présentées. C'est pourquoi le groupe Safran a choisi, en 1999, de réaliser une étude toxicologique appuyée sur une étude de type transversal exposé/non exposé. La période d'enregistrement des données s'étend du 1^{er} janvier 2003 au 31 décembre 2003, elle a intéressé 523 sujets appartenant aux quatre sociétés du groupe industrialisant du composite carbone/carbone. Les effets sur la santé ont été étudiés, en outre, sur la base des réponses à un questionnaire, d'un examen clinique, de la mesure de la courbe débit-volume des EFR et en pratiquant une radiographie pulmonaire standard. L'évaluation des expositions a été réalisée par trois approches différentes (métrologique, « expert » et « autoévaluation » du sujet). L'analyse statistique a été réalisée en regroupant l'ensemble des données des

* Auteur correspondant.

e-mail : dominique-g.martin@snecma.fr

differences observed between the centers using the software Epi Info 6 and SAS.

Results. When the statistical analysis takes into account all the confusion variables and the center effect, the only parameter which remains significantly correlated with exposure to carbon particles is the notion of episodes of skin lesions (declaration of the subject).

Discussion. These results must be interpreted with regard to the problems posed by the recruitment of the subjects, the evaluation of exposures, the use of a declarative questionnaire, the performance of the pulmonary function testing and finally by the interpretation of the lung X-rays.

Conclusion. The only abnormality significantly associated with exposure to carbon particles in this study concerns the existence of episodes of skin lesion, not found in the clinical examination.

© 2010 Published by Elsevier Masson SAS.

Keywords: Carbon, Solid aerosol, Carbon/carbon composite, Clinical epidemiology study

quatre sites et en prenant en compte les facteurs de confusion habituels et les différences observées entre les centres ; elle a été réalisée à partir des logiciels Epi Info 6 et SAS.

Résultats. Lorsque l'analyse statistique prend en compte l'ensemble des variables de confusion et l'effet centre, le seul paramètre qui reste significativement lié à l'exposition aux particules de carbone est la notion d'épisodes de lésions cutanées (déclaration du sujet).

Discussion. Ces résultats doivent être interprétés en fonction des problèmes posés par le recrutement des sujets, par l'évaluation des expositions, par les problèmes posés par l'utilisation d'un questionnaire déclaratif, par les problèmes posés par la réalisation des explorations fonctionnelles respiratoires et, enfin, par l'interprétation des radiographies pulmonaires.

Conclusion. La seule anomalie significativement associée à l'exposition aux particules de carbone dans cette étude concerne l'existence d'épisodes de lésions cutanées, non retrouvées à l'examen clinique.

© 2010 Publié par Elsevier Masson SAS.

Mots clés : Carbone, Aérosol solide, Composite carbone/carbone, Épidémiologie clinique

Introduction

Présentation de l'objectif

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux (fibre/matrice), se complétant pour former un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Concernant les composites carbone/carbone, les fibres en carbone sont assemblées, puis la matrice en carbone sera déposée de façon à combler la porosité de l'architecture fibreuse.

Les matériaux composites carbone/carbone ont été développés, il y a plus de 20 ans, pour répondre aux conditions extrêmes d'emploi dans le spatial. Leurs propriétés exceptionnelles ont été naturellement appréciées dans le domaine de l'aéronautique dont le freinage en constitue le plus bel exemple. Aujourd'hui, ils trouvent également des débouchés d'applications vers l'industrie comme le nucléaire, la sidérurgie, le traitement thermique... mais ce développement industriel ne s'est pas accompagné de recherches permettant de qualifier ces produits dans le domaine toxicologique.

Les fibres de carbone utilisées dans la fabrication des matériaux composites (en particuliers les matériaux carbone/carbone) ont un diamètre aérodynamique élevé (supérieures en général à 6 μm) rendant leur inhalation chez l'homme peu probable. En revanche, les particules émises lors de la manipulation de ces fibres et les matériaux qui en contiennent sont susceptibles de générer un aérosol beaucoup plus fin, donc inhalable. Les particules de carbone sont jusqu'à présent réputées inertes dans les structures biologiques et n'ont pas fait l'objet d'études épidémiologiques significatives.

Or les études expérimentales récentes ont montré que certaines particules réputées inertes pouvaient entraîner des lésions respiratoires parfois irréversibles lorsque leur diamètre était très fin (de l'ordre de la dizaine de nanomètres). C'est pourquoi, après un parcours bibliographique, les entreprises Messier-Bugatti et Snecma Propulsion Solide (productrices et utilisatrices de matériaux composites carbone/carbone au sein du groupe Safran) décidèrent, en 1999, d'organiser un groupe de travail avec pour mission de mener tous les travaux nécessaires pour rechercher une éventuelle incidence des particules de carbone sur la santé des personnes exposées durant leurs activités de travail. L'objectif principal de ce travail a ainsi été de tester l'hypothèse d'un effet essentiellement respiratoire et cutanéomuqueux du contact avec ces particules de carbone (déposition cutanéomuqueuse, déposition dans les voies respiratoires inférieures).

Élaboration des pièces carbone/carbone

La réalisation de pièces carbone/carbone qui permet de passer d'une structure textile souple à une structure organique rigide reconnaît trois grandes étapes au cours desquelles l'exposition à des aérosols carbone est différente, tant en ce qui concerne la nature cristallographique que la concentration en particules (fig 1).

Aiguilletage

Le tissu est empilé ou enroulé autour d'un gabarit en couches successives qui sont solidarisées par aiguilletage. Des aiguilles en forme de harpons traversent les différentes épaisseurs de tissu ; en ressortant, ces aiguilles entraînent des filaments de

la chaîne et de la trame qui vont s'insérer dans les couches supérieures et ainsi créer des « ponts ». C'est la présence de ces « ponts » entre les différentes couches de tissu qui assure la rigidité propre de la pièce textile appelée à ce stade préforme textile.

À ce stade de fabrication, l'exposition des opérateurs d'atelier est en termes de type d'aérosol comparable à celle d'opérateur de l'industrie textile.

Densification

La matrice en carbone est déposée soit par dépôt chimique en phase vapeur¹, soit à partir de résines cokéifiables² pour remplir les vides de l'architecture fibreuse. Ces différentes méthodes de densification permettent d'obtenir des types de « carbone » ayant des caractéristiques particulières, propres à orienter les caractéristiques finales de la pièce dans le sens le plus favorable à l'application visée.

Les caractéristiques des aérosols émis dans l'atmosphère seront directement liées aux opérations de manutention ainsi qu'au degré de densification de la pièce.

Usinage

Les structures rigidifiées par la densification progressive sont « mises en forme » par usinage mécanique.

Durant ces opérations, l'attaque de la structure par l'outil de coupe va libérer dans l'atmosphère un aérosol solide de particules de carbone, plus ou moins dense en fonction, entre autre, du degré de l'imprégnation de la pièce.

Matériel et méthode

Afin de rechercher une éventuelle incidence des particules de carbone sur la santé des personnes exposées durant leurs activités de travail à ces différents types d'aérosols, il a été choisi de retenir trois axes standardisés, à savoir :

- une bibliographie exhaustive ;
- une étude épidémiologique humaine sur la population des opérateurs ;
- un travail de toxicologie expérimentale.

Revue bibliographique

Pour cette recherche, il a été retenu d'analyser le contenu des publications scientifiques concernant la toxicité des particules

et fibres (notamment, de carbone), ainsi que celle des composites (carbone/carbone et carbone/résine).

Étude épidémiologique humaine

Population

L'étude a intégré les quatre centres du groupe Safran ayant des ateliers susceptibles d'exposer les salariés à des aérosols de particules de carbones.

Ont été inclus tous les salariés considérés comme actuellement exposés et/ou ayant été exposés aux particules de carbone et des salariés sans exposition et travaillant sur les mêmes sites. Le choix de ces témoins a été réalisé par les services médicaux de chacun des sites (à l'occasion des visites systématiques de médecine du travail).

Évaluation des expositions

Les expositions ont fait l'objet d'une démarche en quatre étapes :

- le recueil de la perception des salariés quant à leurs expositions potentielles au carbone et aux autres polluants respiratoires (amiante, fibres céramiques, poussières, gaz, vapeurs et fumées) pendant l'ensemble de leur carrière professionnelle (hors groupe Safran et dans le groupe) ;
- une expertise des expositions emploi par emploi concernant les expositions potentielles au carbone et aux autres polluants respiratoires (amiante, fibres céramiques, poussières, gaz, vapeurs et fumées). Cette expertise a été menée conjointement par les équipes du groupe Safran et celle du laboratoire santé travail environnement (LSTE, EA 3272, ISPED, UFR 99 santé publique, université Bordeaux 2) pour les emplois hors groupe et spécifiquement par l'équipe du groupe Safran pour les emplois de ce groupe ;
- une synthèse des expositions à chacun des polluants sélectionnés a été réalisée sur l'ensemble de la vie professionnelle pour avoir la durée cumulée des expositions, ainsi qu'en séparant les expositions correspondant à trois périodes (période antérieure au groupe Safran, emplois anciens dans le groupe et dernier emploi dans le groupe) ;
- une métrologie ponctuelle des particules de carbone sur les postes actuels des principaux ateliers des sites considérés comme exposés. Cette métrologie a été réalisée par l'équipe du groupe Safran.

Remarque concernant le prélèvement des atmosphères de travail

Pour que les prélèvements soient représentatifs des types d'atmosphères inhalées par les opérateurs, les caractéristiques morphologiques propres aux éléments constituant les poussières industrielles de carbone ont imposé l'aménagement de la méthode normalisée de prélèvement (norme française [NF] X43-269 ; détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie optique en contraste de

¹ « Voie gazeuse » : dans ce cas, le précurseur hydrocarboné est un gaz qui diffuse dans la porosité avant d'être décomposé en carbone qui se dépose à la surface des fibres ; ce carbone déposé est appelé « pyrocarbone ».

² « Voie liquide » : dans ce cas, le précurseur est une résine organique que l'on fait pénétrer à l'état liquide dans la porosité, puis elle est polymérisée, réticulée in situ avant d'être carbonisée ($\approx 900^\circ\text{C}$ – atmosphère neutre). « Voie brai » : dans ce cas, le précurseur est un polymère organique thermoplastique, les plus courants étant les brais.

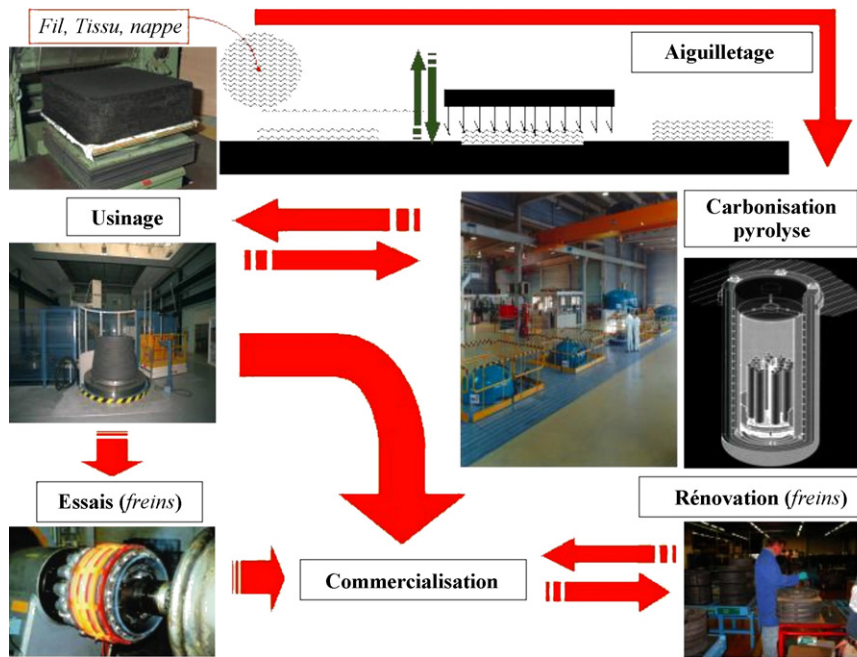


Figure 1. Les grandes étapes de production de pièces composite carbone/carbone.

phase – méthode du filtre à membrane) tout en lui conservant ses caractères d'objectivité, de reproductibilité et de fiabilité.

Remarque concernant la caractérisation des atmosphères de travail

Les campagnes de mesurages des atmosphères de travail réalisées selon la NF X43-262 (détermination gravimétrique du dépôt alvéolaire de la pollution particulaire ; méthode de la coupelle rotative) de caractérisation de l'air des lieux de travail ont bien attesté du respect de la réglementation concernant les valeurs limites d'exposition professionnelle à des poussières sans effet spécifique³ mais, compte tenu de la faible densité des poussières de carbone, le comptage particulaire en microscopie optique a mis en évidence que pour qu'une atmosphère de travail comporte plus de 5 mg par mètre cube de poussière de carbone, il fallait que la concentration en particules soit supérieure à 154 particules centimètre cube (fig. 2).

C'est pourquoi et afin de disposer d'éléments réellement représentatifs des atmosphères de travail, il a été décidé de retenir un mode de comptage des particules par classe de tailles (particules de taille comprise entre 0,8 et 5 μm , particules de taille comprise entre 5 et 10 μm et fibres « OMS », soit de longueur [L] supérieure à 5 μm , diamètre [D] inférieur à 3 μm ⁴).

³ VME (pour une exposition de huit heures par jour) : moins de 5 mg par mètre cube pour les poussières de la fraction alvéolaire et moins de 10 mg par mètre cube pour les poussières de la fraction inhalable.

⁴ Recommandation CRAM Aquitaine concernant la présence de fibres de carbones dans les atmosphères de travail ; respecter une concentration moyenne inférieure à une fibre par centimètre cube.

Évaluation des effets

Les effets sur la santé ont été étudiés en outre sur la base des réponses à un questionnaire fermé et standardisé (questionnaire type MRC), de l'examen clinique réalisé lors de la visite médicale, ainsi que de la mesure de la courbe débit-volume des EFR et en pratiquant une radiographie pulmonaire standard de face.

Questionnaire et examen clinique

L'ensemble des questions a fait l'objet de regroupement permettant de définir des entités morbides, à savoir : bronchite, asthme, hyper-réactivité respiratoire, allergie, dermite constatée à l'examen clinique.

Explorations fonctionnelles respiratoires (EFR)

Une mesure de la boucle débit-volume a été réalisée dans tous les services de médecine du travail après une formation préalable des personnels médicaux et infirmiers. Ont été pris en compte les paramètres suivants : pourcentage par rapport aux valeurs théoriques des paramètres suivants : CVF, VEMS, DT, DEMM ; rapport des valeurs absolues VEMS/CVF.

Un regroupement a été fait pour caractériser les éventuelles troubles ventilatoires :

- les troubles ventilatoires obstructifs (TVO) si le rapport VEMS/CVF était inférieur à 70 % ;
- les maladies des petites voies aériennes (MPVA) si le rapport VEMS/CVF était supérieur ou égal à 70 % et le DEMM inférieur à 70 %.

Les autres profils ont été regroupés dans une seule catégorie (« autres »).

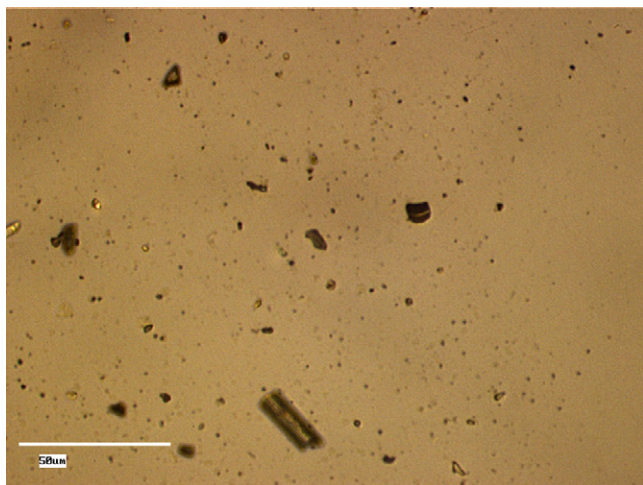


Figure 2. Filtre de prélèvement en microscopie optique.

Radiographie pulmonaire standard de face

Une radiographie pulmonaire standard de face a été réalisée à l'occasion de cette étude. Elle a fait l'objet d'une lecture standardisée selon la classification des radiographies de pneumoconioses du Bureau international du travail. Les anomalies constatées ont été regroupées en deux catégories selon qu'elles touchaient la plèvre (épaississements) ou le parenchyme pulmonaire (images interstitielles).

Type d'étude et analyse statistique

L'enquête est une étude de type transversal exposé/non-exposé. L'analyse statistique a été réalisée en regroupant l'ensemble des données des quatre sites, dans le but de tester l'hypothèse du rôle du carbone sur une altération de la santé, en prenant en compte tous les facteurs de confusion habituelle (âge, tabac, antécédents médicaux, exposition professionnelle autre que le carbone) et les différences observées entre les centres. Elle a été réalisée à partir des logiciels Epi Info 6 et SAS.

Toxicologie expérimentale⁵

Afin de pouvoir disposer de tout élément permettant de définir une position quant à une éventuelle incidence des particules de carbone sur la santé des personnes exposées durant leurs activités de travail, le groupe de travail Safran a décidé d'engager un programme de recherche fondamentale articulé autour de deux types d'études :

- une analyse de la réactivité de surface des particules des différents types d'aérosols de carbone mis en œuvre dans les ateliers ;
- une analyse in vitro de la toxicologie cellulaire des différents types de carbone mis en œuvre dans les ateliers.

Remarque concernant la réalisation des études

Pour chacun des composants de cette étude, le groupe de travail a choisi de se faire assister ou de déléguer leurs réalisations techniques à des structures extérieures indépendantes et de compétences scientifiques reconnues :

- pour l'étude épidémiologique humaine, par l'équipe du LSTE ;
- pour la mise au point de la technique de prélèvement des atmosphères de travail, par l'Institut européen de l'environnement de Bordeaux (IEEB, laboratoire accrédité Cofrac) ;
- pour l'analyse de la réactivité de surface des particules de carbone, par le laboratoire de réactivité de surface (LRS, université Pierre-et-Marie-Curie : *Étude de la réactivité des particules de carbone en relation avec leur activité oxydante*) ;
- pour l'analyse in vitro de la toxicologie cellulaire des différents types de carbone, par le laboratoire polluants et santé de l'INRS, centre de Lorraine : *Recherche des effets cytotoxiques, génotoxiques et transformants de fibres et particules de carbone par des tests in vitro*.

Résultats

Bibliographie

Présentation synthétique des résultats des données épidémiologiques humaines

L'appareil respiratoire

Concernant l'appareil respiratoire, pour Jones et al. [1], Troiskaia et al. [2] et Fediakina [3], « aucune anomalie respiratoire fonctionnelle ni radiographique n'a été observée », seules des « pathologies ORL hautes et bronchiques ont été observées sur environ la moitié des sujets explorés », ainsi que des « signes de détérioration respiratoire et début d'atrophie de la muqueuse des voies respiratoires sur environ la moitié des sujets explorés ».

L'appareil dermatologique

Pour l'appareil dermatologique, seule une dermatose d'irritation peut être retenue, le bilan allergologique étant négatif.

L'examen d'implants

Le constat a pu être fait d'une inertie ou résorption chimique et fragmentation plus ou moins importante (dans les tissus mous), en fonction du degré de cristallinité et des fonctions de surface ; Muckle et Minns [4] notent une bonne tolérance, avec infiltration de collagène visible en microscopie électronique [5]. De même, pour Valla et al. [6], on observe une bonne tolérance à 20 ans des implants de valve cardiaque.

Données de la toxicologie expérimentale

Des informations recueillies dans les deux champs de la toxicologie expérimentale, on retiendra les suivants.

⁵ Cette approche toxicologique fera l'objet d'une autre publication.

In vitro

Pour les études « in vitro », « Les fibres à base de PAN (polyacrylonitrile) ont été inactives dans les échanges chromatides sœurs et les tests de synthèse d'ADN non planifiés (mesure du potentiel carcinogène dans les systèmes cellulaires in vitro des mammifères) » [7] et, pour Troiskaia [8], « L'étude comparative de la cytotoxicité des poussières par la méthode de chimioluminescence et de détermination de la vitalité des macrophages a globalement montré des changements analogues dans l'action des différentes poussières étudiées. D'après le degré de cytotoxicité, les poussières peuvent être classées dans l'ordre décroissant suivant : amiante, fibre de carbone et basalte, fibres de cellulose ».

In vivo

Pour les études « in vivo », il est à souligner que :

- par inhalation, il a été observé « des particules non fibreuses dans les éléments lymphoïdes et macrophagiques » ainsi que « des particules fibreuses pulmonaires extracellulaires » mais « aucune réaction spécifique tissulaire non réversible (inflammation ou fibrose) » n'a été décrite [13-16] ;
- par instillation intratrachéale, Luchtel [9], ECETOC [10] et Martin et al. [11] ont mis en évidence une « réaction inflammatoire, cytotoxicité et fibrose pulmonaire » ; de même, pour Fedyakina [12], « l'étude de l'action biologique des poussières de fibres de carbone ex-PAN et ex-cellulose a montré leur action irritante et modérément fibrinogène ; l'étude comparative de l'action biologique des matériaux fibreux carbone a démontré la similitude de leur action. Pourtant, l'effet fibrinogène est un peu plus « exprimé » sur la poussière de fibre ex-PAN⁶ » ;
- par l'instillation intrapéritonéale, on n'observe « pas de processus pathologique » [14] ;
- l'application de suspension sur la peau a permis de mettre en évidence que « les fibres à base de PAN... ne sont pas carcinogènes lorsque les suspensions de benzène sont appliquées sur le dos rasé des souris » [7] ;
- de même, l'instillation d'une suspension dans l'œil d'un lapin entraîne un érythème et un chémosis, réversibles [17]. Enfin, l'examen d'implants tissulaires a permis de reconnaître une « réaction inflammatoire minime intra-articulaire » [4], une phagocytose et une fibrose au niveau osseux ; mais « aucun signe histologique de malignité au niveau musculaire » [9].

⁶ Les fibres PAN sont des précurseurs des fibres de carbone, composées de longues chaînes de polyacrylonitrile. Par traitement thermique (700 à 1500°C), les atomes d'hydrogène et d'azote (composant de la molécule de PAN avec le carbone) sont progressivement éliminés ; seul reste les atomes de carbone qui se réorganisent en chaînes de cycles hexagonaux.

Remarque générale concernant l'analyse des données bibliographiques

Peu de publications sont disponibles et le faible niveau de précision concernant leurs conditions de réalisation « invalide » les conclusions présentées. En effet :

- pour les études épidémiologiques humaines, les caractéristiques des atmosphères de travail sont imprécises (nature, granulométrie...), la méthodologie des études est décrite de manière incomplète (caractérisation de populations, déroulé opératoire...) et les conditions de recueil des données sont peu ou pas décrites ;
- pour les études expérimentales animales, les caractéristiques des aérosols sont mal précisées (nature, granulométrie...) et les conditions expérimentales sont assez éloignées des conditions réelles de travail.

C'est pourquoi le groupe de travail Safran a retenu la conclusion donnée par Petit-Moussally et al. [18], à savoir : « ... Les données toxicologiques disponibles concernant les fibres de carbone sont encore insuffisantes et pas toujours pertinentes pour permettre une évaluation de risque complète et détaillée de leurs effets sur la santé de l'homme au travail... ».

Épidémiologie*Description de la population*

Cinq cent trente-trois sujets ont été inclus par la médecine du travail des différents sites ; parmi ceux-ci, 26 ont refusé de participer à l'étude ; au total : 507 sujets ont été analysés. Il s'agissait d'hommes pour 95 % des sujets, âgés de 42,1 ± 9,5 ans avec des extrêmes de 20 ans à 61 ans.

Consommation tabagique

La répartition est assez homogène selon les classes de consommation tabagique (non-fumeurs : 195 sujets, soit 38 % ; ex-fumeurs : 161 sujets, ayant fumé 18,2 ± 15,2 paquets-années ; fumeurs actuels : 160 sujets, ayant fumé 16,6 ± 14,6 paquets-années).

Exposition au carbone

L'exposition au carbone a été analysée en fonction des modalités de recueil de cette information.

Exposition au carbone au poste actuel

Elle est analysée en fonction des trois sources d'information disponible dans l'étude : l'autoévaluation du sujet (« sujet »), l'avis des experts (« expert ») et les données de la métrologie.

Aspect qualitatif non exposé/exposé

	Non-exposés (%)	Exposés (%)
Sujet	45,6	54,4
Expert	47,5	52,5
Métrologie	55,1	44,9

Aspect quantitatif en quatre classes d'exposition

Les sujets exposés ont été analysés en fonction des classes d'exposition croissante⁷ définies par les experts et les responsables des données météorologiques. Le tableau suivant décrit la répartition des effectifs selon que les sujets ont été classés par les experts ou à partir des données météorologiques.

	Experts (n)	Méto (n)
Classe 1	44	42
Classe 2	148	130
Classe 3/4	74	55
Total	266	227

Globalement, il existe une bonne concordance entre les deux méthodes (Kappa = 0,74), en dépit des différences de méthodes : l'expert se prononce sur la notion d'exposition depuis le début de l'emploi correspondant de chaque sujet, alors que les données météorologiques ont été recueillies à un instant donné qui n'est pas nécessairement représentatif de la situation habituelle de chacun des postes.

Exposition au carbone aux emplois du groupe Safran antérieur au poste actuel (« ATCD groupe Safran »)

La répartition qualitative des expositions est faite sur la base de la seule autoévaluation des sujets et de l'avis des experts.

	Non-exposés (%)	Exposés (%)
Sujet	51,0	48,9
Expert	60,5	39,5

Exposition au carbone aux emplois hors du groupe Safran (« ATCD hors groupe Safran »)

Les experts ont considéré que seulement 7,1 % des sujets avaient pu être exposés avant leur entrée dans le groupe Safran. L'analyse des calendriers professionnels montre qu'il s'agissait, la plus part du temps, de sous-traitants du groupe.

Exposition au carbone sur l'ensemble de la vie professionnelle

Lorsque l'on cumule tous les emplois de chaque sujet, les experts ont considéré que 60,1 % des sujets (soit 305 sujets) ont été exposés au moins une fois aux particules de carbone, contre 39,9 % (soit 202) qui n'ont jamais été exposés. Ainsi, ce sont ces deux groupes de sujets qui seront considérés respectivement comme population exposée au carbone et population témoin dans la suite des analyses sur les effets sanitaires.

Exposition professionnelle à des aérocontaminants en dehors des particules de carbone

L'objectif de l'étude étant de tester l'hypothèse du rôle du carbone sur la santé, il a été nécessaire de prendre en compte les expositions aux autres aérocontaminants auxquels les

sujets ont pu être exposés sur l'ensemble de leurs carrières professionnelles.

Au total : les experts ont retrouvé une exposition professionnelle probable pour les polluants suivants.

	Sujets	Pourcentage
Amiante	236	61,4
Fibres céramiques	54	14,1
Poussières	359	93,5
Gaz vapeurs	368	95,8
Fumées	214	55,7
Tout polluant hors carbone	384	75,7

*Répartition des facteurs de confusion selon les classes d'exposition au carbone**Carbone et tabac*

Il existe une augmentation significative du nombre de fumeurs actifs chez les sujets exposés au carbone.

	Non-exposés (%)	Exposés (%)	p
Fumeurs	26,3	37,6	< 0,01
Ex-fumeurs	26,8	29,0	0,62
Non-fumeurs	46,7	33,3	< 0,01

Carbone et autres expositions professionnelles

De la même façon, on retrouve une association très significative entre l'exposition au carbone et aux autres aérocontaminants ($p < 0,01$ pour l'ensemble des polluants).

	Non-exposés (%)	Exposés (%)
Amiante	20,3	63,9
Fibres céramiques	0,9	17,0
Poussières	41,5	90,8
Gaz vapeurs	45,0	91,8
Fumées	20,3	56,7
Tout polluant	47,0	94,7

Effets sur la santé et exposition aux particules de carbone

Une première analyse est faite sans ajustement sur les facteurs de confusion

Données cliniques (questionnaire et examen clinique)

La comparaison des sujets exposés et non exposés montre un excès significatif ($p < 0,02$) de symptômes évoquant une hyper-réactivité des muqueuses respiratoires et surtout un excès significatif ($p < 0,01$) d'épisodes de lésions cutanées (données d'interrogatoire et non pas d'examen clinique) déclarées par le sujet.

	Non-exposés (%) (n = 202)	Exposés (%) (n = 305)	p
Bronchite	3,9	4,9	ns
Asthme	12,3	15,4	ns
Asthme récent	2,4	3,6	ns
Hyperréactivité	51,9	62,3	0,02
Allergie respiratoire	35,1	38,3	ns
Dermite clinique	4,4	4,6	ns
Épisodes de lésions cutanées	25,2	40,9	< 0,01

Les différences statistiquement significatives sont notées en gras et italique.

⁷ Classes d'exposition : classe 1 : concentration inférieure à dix particules par centimètre cube ; classe 2 : concentration comprise entre dix et 20 particules par centimètre cube ; classe 3 : concentration supérieure à 20 particules par centimètre cube.

Radiographies pulmonaires

Il existe un excès significatif d'épaississements pleuraux chez les sujets exposés ($p = 0,04$).

	Non-exposés (%) (n = 171)	Exposés (%) (n = 116)	
Toute anomalie	n = 35 (20,4)	n = 31 (26,7)	ns
Anomalie pleurale	n = 11 (31,4)	n = 12 (38,7)	p = 0,04
Anomalie parenchymateuse	n = 22 (62,8)	n = 16 (51,6)	ns
Anomalie plèvre et parenchyme	n = 2 (5,7)	n = 3 (9,6)	ns

Les différences statistiquement significatives sont notées en gras et italique.

Explorations fonctionnelles respiratoires

Après regroupement selon les degrés d'obstruction bronchique, on retrouve une augmentation significative ($p < 0,01$) des troubles ventilatoires obstructifs et des maladies des petites voies aériennes chez les sujets exposés (17,1 % de 251 sujets) par rapport aux non-exposés (12,6 % de 174 sujets).

Prise en compte des facteurs en confusion

Lorsque l'analyse statistique prend en compte l'ensemble des variables de confusions et l'effet centre, le seul paramètre qui reste significativement lié à l'exposition aux particules de carbone est la notion d'épisodes de lésions cutanées (déclaration du sujet).

Discussion

L'analyse des données sanitaires (questionnaire, examen clinique, explorations fonctionnelles respiratoires, radiographie pulmonaire) des sujets considérés comme exposés au carbone par rapport à un groupe témoin non exposé provenant des mêmes établissements n'a pas retrouvé, après ajustement sur les variables de confusion (âge, tabac, centre, autres expositions professionnelles) d'épisodes de lésions cutanées. Ces résultats doivent être interprétés en fonction des points de discussions suivants.

Problèmes posés par le recrutement des sujets

Il s'agit d'une étude transversale soumise au biais classique du travailleur sain (*healthy worker effect*) qui a tendance à sous-estimer les effets réels des expositions (mutation progressive des sujets symptomatiques). Par ailleurs, la population témoin appartient à une catégorie socioprofessionnelle sensiblement supérieure (proche du secteur tertiaire) à celle de la population exposée, ce qui a tendance à sélectionner également des sujets en bonne santé. La résultante de ces biais ne peut pas être évaluée dans ce type d'étude et justifie un suivi longitudinal.

Problèmes posés par l'évaluation des expositions (carbone et autres polluants)

L'évaluation des expositions a été réalisée par trois approches différentes.

L'approche métrologique

L'approche métrologique est certainement la plus adaptée aux situations existantes au moment du prélèvement. Néanmoins, elle ne prend pas en compte les fluctuations d'activités au court du temps sur un même poste.

L'approche « expert »

L'approche « expert » est certainement plus proche de la moyenne des expositions sur les postes actuels où une analyse détaillée de l'activité de l'ensemble des sites a été réalisée par un technicien d'hygiène et de sécurité à l'occasion d'un stage de formation à l'IUT de l'université Bordeaux 1. Il n'a malheureusement pas été possible de faire une étude aussi précise des postes antérieurs aux postes actuels en raison des difficultés d'accès à l'historique des activités et des méthodes de protection collective qui leur étaient associées.

L'approche « autoévaluation » du sujet

L'approche « autoévaluation » du sujet est probablement plus subjective, bien que la comparaison avec les deux méthodes précédentes soit relativement satisfaisantes.

Par ailleurs, les résultats obtenus par la méthode de comptage utilisée ne permettent pas d'identifier la nature chimique des particules et ne prend pas en compte les particules ultra fines de carbone.

Au total, les difficultés de ce type d'évaluation peuvent aboutir à des erreurs de classification entre exposés et non-exposés, dont les conséquences sont habituellement une diminution du risque potentiel (tendance vers le risque nul). Les mêmes remarques sont également valables pour les évaluations réalisées à propos des expositions aux autres aérocontaminants professionnels.

Problèmes posés par l'utilisation d'un questionnaire déclaratif

Il est habituel dans ce genre d'enquête de prendre le risque d'induire certaines réponses chez les sujets exposés par rapport aux sujets non exposés. Néanmoins, les analyses complémentaires ont permis de retrouver certaines associations connues comme la relation entre les symptômes respiratoires et la consommation tabagique. Ce constat est un élément en faveur de la robustesse des informations recueillies par ce questionnaire. Il n'en est pas moins vrai que la seule anomalie qui persiste dans le groupe exposé par rapport au groupe non exposé est une donnée d'interrogatoire (antécédents de lésions cutanées) qui n'a pu être vérifiées lors de l'examen clinique des sujets.

Problèmes posés par la réalisation des explorations fonctionnelles respiratoires

Les résultats des explorations fonctionnelles respiratoires peuvent être biaisés par le fait de réaliser des examens sur

des machines différentes. C'est la raison pour laquelle un test complémentaire a été réalisé sur l'ensemble des machines utilisées par les quatre centres. Sous réserve du faible nombre de mesures réalisées (30 sujets ont testé les quatre machines dans un ordre aléatoire), il n'a pas été trouvé de différence significative entre les quatre machines.

Problèmes posés par l'interprétation des radiographies pulmonaires

La lecture des radiographies pulmonaires a fait apparaître un excès significatif d'épaississements pleuraux. Ceux-ci ne sont pas liés à l'exposition aux particules de carbones ni aux fibres céramiques. En revanche, il existe une liaison significative avec les expositions à l'amiante, liaison qui persiste après prise en compte de l'indice de masse corporel. Ce résultat est cohérent avec la littérature scientifique dans ce domaine.

Conclusion

La seule anomalie significativement associée à l'exposition aux particules de carbone dans cette étude concerne l'existence d'épisodes de lésions cutanées, non retrouvées à l'examen clinique. Néanmoins, les limites de l'étude, évoquées dans la discussion de ce rapport, suggèrent de porter les efforts ultérieurs sur deux domaines :

- la réévaluation des expositions aux particules de carbone (particules fines et ultrafines) ;
- la réalisation d'un suivi longitudinal de cette population.

Références

- [1] Jones HD, Jones TR, Lyle WH. Carbon fibre results of a survey of process workers and their environment in a factory producing continuous filament. *Ann Occup Hyg* 1982;26(1-4):861-8.
- [2] Troistkaya N, et al. A comparative fibrogenicity of carbon fibres and asbestos. *Hyg Sanit* 1984;6:18-20.
- [3] Fedjakina RP. L'hygiène du travail dans la production de fibres de carbone à partir de fibres polyacrylonitriles et d'hydrate de cellulose. *Gig Tr Prof Zabol* 1985;9:26-9.
- [4] Muckle DS, Minns RJ. Biological response to woven carbon fibre pads in the knee: a clinical and experimental study. *J Bone Joint Surg Br* 1990;72B(1):60-2.
- [5] Cooperative Retrieval Program of Explanted Prostheses. Mechanisms of failure for anterior cruciate ligament prostheses implanted in humans; a retrospective analysis of 79 surgically excised explants. *Polym Polym Compos* 1995;3(2):79-97.
- [6] Valla J, Langanay T, Corbineau H, et al. Résultats éloignés à 20 ans de remplacement valvulaire aortique par prothèse de Bjork-Shiley standard. *Arch Mal Cœur Vaiss* 1996;89(9):1137-43.
- [7] INRS. Fiche toxicologique de la fibre carbonée magnanite, 1989.
- [8] Troiskaia NA. A comparative cytotoxicity study of dust of carbon fibres and fibrous materials. *Hyg Sanit* 1993;3:28-30.
- [9] Luchtel DL. Carbon/graphite toxicology. In: Warheit DB, editor. *Fiber toxicology*. San Diego, California: Academic Press Inc; 1993. p. 493-521.
- [10] European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical [ECETOC]. *Toxicology of man-made organic fibres (MMOF) 1996* [Technical report, 69].
- [11] Martin TR, Meyer SW, Luchtel DL. An evaluation of the toxicity of carbon fiber composites for lung cells in vitro and in vivo. *Environ Res* 1989;49:246-61.
- [12] Fedyakina R. The study of biological effects of dusts of carbon fibre materials on humans. *Labour Hyg* 1984;8:30-2.
- [13] Holt PF, Horne M. Dust from carbon fibre. *Environ Res* 1978;17:276-83.
- [14] World Health Organization [WHO]. *Selected synthetic organic fibres. Environmental Health Criteria*, 1993; 151.
- [15] Owen PE, Glaister JR, Ballantyne B, et al. Subchronic inhalation toxicology of carbon fibers. *J Occup Med* 1986;28(5):373-6.
- [16] Waritz RS, Ballantyne B, Clary JJ. Subchronic inhalation toxicity of 3,5 µm diameter carbon fibers in rats. *J Appl Toxicol* 1998;18:215-23.
- [17] Thomson AS. *Toxicology of carbon fibers*; 1989. p. 29-33.
- [18] Petit-Moussally S, Le Bâcle C, Vincent R, et al. Les fibres de carbone et de graphite ; éléments pour une évaluation du risque. *Doc Med Travail* 2002;92:353-61.