



**Master Ingénierie de la Santé, Qualité – Environnement – Santé –
Toxicologie Option Toxicologie Industrielle**

Année Universitaire 2020 - 2021

Mémoire de fin d'études de la 2^{ème} année de Master

Présenté et soutenu le 15 septembre 2021 par

Madame EL KAASAOUI Sanaa

***CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION DES SALARIÉS À
LA FRACTION ALVÉOLAIRE DES FUMÉES DE SOUDAGE***

Sous la direction de Madame BOUDJEMA Jamila

Composition du jury :

Président du jury : Dr DENAYER Franck-Olivier – Maître de Conférences des Universités

Directrice de mémoire : Mme BOUDJEMA Jamila – Toxicologue Industrielle

3^{ème} Membre du jury : Mme GRARE Céline – Ingénieure en expérimentations
biologiques

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je souhaiterais dans un premier temps remercier ma Directrice de mémoire, Jamila BOUDJEMA, toxicologue industrielle, pour le temps qu'elle m'a consacré durant mon contrat de professionnalisation, pour son encadrement, le partage de son savoir et ses conseils dans l'écriture de ce travail. Grâce aussi à sa confiance, sa bonne humeur et son énergie, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions.

Durant cette étude, j'ai eu la chance de pouvoir rencontrer de nombreux professionnels qui m'ont aidée à faire de cette expérience un enrichissement professionnel. Leur partage de connaissances et leurs nombreux échanges ont permis de contribuer à l'aboutissement de ce mémoire. Ainsi, je tenais à remercier Sarah RUCK, Laura LESUR, Lucie PEREIRA, Helene LIGNIER, Marie-Claire DELPIERRE, pour leur accueil, leur collaboration et leur précieuse aide.

Je remercie également toute l'équipe d'Action Santé Travail pour leur accueil, leur esprit d'équipe et leurs réponses à mes nombreuses questions, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et qui se sont investies dans la relecture.

Je remercie la Faculté d'Ingénierie et de Management de la santé (ILIS) et toute l'équipe pédagogique, notamment Guillaume GARÇON qui, par le biais de leur formation et de leur suivi, m'a permis d'effectuer ce contrat de professionnalisation et d'enrichir mon expérience professionnelle.

Enfin, un grand merci à ma famille, mes amis et mes collègues qui m'ont apporté une aide précieuse en prenant le temps d'écouter mon raisonnement et en me proposant de relire ce travail.

Sommaire

Introduction	1
I. État de l'art	5
1. Généralités sur les fumées de soudage	5
2. Effets sur la santé	8
3. Le contexte réglementaire	15
II. Matériels et méthodes	19
1. Étude de situation	19
2. Campagne de mesurage et analyse des résultats	21
3. Analyse et interprétation des résultats	27
III. Résultats	29
1. Étude de situation	29
2. Études de postes	31
3. Positionnement des capteurs	33
4. Résultats des mesures des campagnes de prélèvement et interprétation	34
5. Analyse statistique	45
IV. Discussion	48
Conclusion	56
Bibliographie	58
Liste des figures	66
Liste des tableaux	67
Annexes	68

Liste des abréviations

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AT : Accident de Travail

ATS : American Thoracic Society

AST : Action Santé Travail

BPCO : Broncho-pneumopathie obstructive

CARSAT : Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

CBP : Cancer Broncho-Pulmonaire

CMR : Cancérogènes Mutagènes Reprotoxiques

CNAM : Caisse Nationale de l'Assurance Maladie

CRAM : Caisse Régionale d'Assurance Maladie

DGT : Direction Générale du Travail

EPC : Equipements de Protection Collective

EPI : Equipements de Protection Individuel

FDS : Fiche de Données de Sécurité

FS : Fumées de Soudage

GEH : Groupe d'Exposition Homogène

GES : Groupes d'Exposition Similaire

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

LICT : Laboratoire Interrégional de Chimie et Toxicologie

MAG: Metal Activ Gas

MIG : Metal Inert Gas

MMA : Manual Metal Arc

MP : Maladie Professionnelle

NF : Norme Française

OSHA : Occupational Safety and Health Administration

PUF : Particule Ultra Fine

PSES : Poussières réputées Sans Effet Spécifique

TIG : Tungsten Inert Gas

UV : Ultraviolets

VLCT : Valeur Limites d'exposition à Court Terme

VLEP : Valeurs Limites d'Exposition Professionnelle

VME : Valeur Moyenne d'Exposition

Introduction

La préservation de la santé et de la sécurité des travailleurs est une des préoccupations majeures des employeurs. En 2019, plus de 650.000 accidents de travail (AT) et presque 51.000 maladies professionnelles (MP) ont été déclarés en France. Les AT/MP sont non seulement des sources de traumatismes pour les travailleurs, mais ils engendrent également des impacts économiques, juridiques et sociaux pour les entreprises. C'est pourquoi la sécurité et la santé au travail est un enjeu de santé publique. [1]

Les conditions de travail sont largement encadrées par la réglementation qui indique que l'employeur doit veiller à la sécurité et à la protection de la santé de ses salariés.

Les articles R.4412-1 à R.4412-58 du Code du travail (décret n°2003-1254 du 23/12/2003) établissent les règles générales de prévention du risque chimique. Il existe également des mentions particulières pour les agents Cancérogènes Mutagènes et Reprotoxiques (CMR) qui sont prescrites dans les articles R.4412-59 à R.4412-93 (Décret n°2001-97 du 01/02/2001).[2]

Les agents chimiques dangereux soumis aux règles générales de prévention du risque chimique au sens de l'article R. 4412-3 du Code du travail comprennent les substances :

- Classées selon les règles européennes de classification et d'étiquetage, incluant les agents chimiques classés CMR ou de catégorie 2 (règlement CLP) mais excluant les agents chimiques CMR classés en catégories 1A ou 1B (règlement CLP).
- Affectées d'une valeur limite d'exposition professionnelle.
- Dont le caractère cancérogène est reconnu dans un tableau des maladies professionnelles (les poussières minérales contenant de la silice cristalline).
- Identifiées par les scientifiques comme dangereux dont les agents classés cancérogènes par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) mais non dangereux par la réglementation européenne comme les fumées de soudage (FS). [3]

Les FS, causant de graves dommages au système respiratoire, ont été classées par le CIRC, en 1990, dans le groupe 2B, soit considérées comme agent pouvant être cancérogène pour l'homme (monographie 49), sur la base d' « indications limitées chez l'Homme » et d'« indications insuffisantes chez l'animal de laboratoire».[4]

Cependant, 27 ans plus tard, le classement est revu, à la suite des travaux du groupe de travail sur l'évaluation des risques cancérogènes pour l'homme. Le CIRC classe en 2017 les fumées de soudages dans le groupe 1, agents cancérogènes avérés pour l'homme

principalement pour le cancer du poumon (fumées), et pour le mélanome oculaire, un type de cancer des yeux (radiations Ultraviolets (UV)) (monographie 118).[5]

En France, l'exposition aux FS concernerait 598 000 salariés selon l'enquête SUMER de 2010.[6]

Les soudeurs sont exposés à des polluants de nature diverse qui sont émis lors des opérations de soudage. L'exposition à ces polluants peut être à l'origine de pathologies dont les principales cibles sont les voies respiratoires.

Aujourd'hui encore, la connaissance des effets néfastes provoqués par les FS ne sont pas encore totalement établis car :

- Il est difficile de caractériser spécifiquement les risques de l'exposition aux FS sur l'organisme.
- Les FS sont composées d'un cocktail de polluants de caractéristiques physico-chimiques différentes.
- La composition des FS dépend de nombreux paramètres tels que les métaux soudés, les techniques des soudages utilisés, le savoir-faire du soudeur, la ventilation des locaux, les dispositifs d'aspiration des FS à la source etc...

De nombreuses études épidémiologiques ont démontré l'existence d'une relation de causalité entre l'exposition aux FS et l'altération de la fonction pulmonaire. Parmi les effets indésirables rapportés, le déclin accéléré de la fonction pulmonaire, la prévalence accrue de bronchites chroniques, l'apparition de pathologies comme l'asthme, la bronchopneumopathie chronique obstructive et le cancer du poumon ont été régulièrement cités.[7]

Afin de prévenir des maladies professionnelles, la réglementation impose que l'exposition des salariés aux polluants présents sur les lieux de travail soit évitée ou réduite aux niveaux les plus bas possibles. La réglementation établit des Valeurs Limites d'Exposition Professionnelle (VLEP) pour une liste de polluants dont l'expertise scientifique est confiée à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) depuis 2005.

Les VLEP recommandées par l'ANSES sont des niveaux de concentration de polluants dans l'atmosphère des lieux de travail à ne pas dépasser sur une période de référence déterminée pendant un temps déterminé, pour protéger la santé des travailleurs en l'état des connaissances au moment de l'expertise.

Cette définition est valable pour les polluants avec un effet dit à seuil de dose, c'est-à-dire qu'il est possible d'identifier une dose limite (un seuil) en dessous de laquelle l'effet néfaste ne peut pas apparaître.

Le ministère chargé du travail fixe les VLEP (article R. 4412-4) qui peuvent être contraignantes si elles sont fixées par décret ou, indicatives, si elles sont fixées par arrêté. L'application de la VLEP s'intègre dans la démarche globale de prévention du risque chimique, en milieu professionnel pour le personnel exposé à tout agent chimique pouvant présenter un risque pour la santé.[8]

En France, la VLEP sur huit heures pour la totalité des particules composant les FS est de 5 mg/m^3 . [7]

Cette valeur a été fixée en 1987 et aucun élément scientifique concernant l'élaboration de cette valeur ni son choix pour l'application en France n'est disponible.

Selon l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), la valeur de 5 mg/m^3 permet de protéger le travailleur de la fièvre des fumées métalliques et des irritations des voies respiratoires.

L'agence américaine limite ses observations à la composition des FS, seules les fumées d'acier doux, de fer et d'aluminium sont prises en compte et la granulométrie n'est pas intégrée dans les recommandations.

Les effets sur la santé des FS sur les salariés exposés dépendent de leur composition et il est fortement supposé que la distribution granulométrique des particules qui les composent, puisse représenter un facteur important dans la détermination de leur potentiel de danger. Or, il a été montré que les FS étaient principalement constituées de particules de taille ultra fine se situant entre $0,01$ et $0,10 \mu\text{m}$. Cette spécificité est importante du point de vue toxicologique, car la pénétration, la biodisponibilité des particules ultrafines et de leurs agrégats à travers l'arbre respiratoire dépend presque essentiellement de leur taille.[9]

C'est également cette fraction qui leur confère des propriétés physico-chimiques et un effet biologique pouvant être différents des particules de même nature, mais de taille supérieure. Actuellement, l'évaluation de l'exposition professionnelle est réalisée, en mesurant la concentration de la totalité des FS présente dans l'environnement du travailleur. En réalité, il s'agit de prélever la fraction particulaire des fumées émises et de déterminer une concentration pondérale qui sera comparée à la VLEP.

La méthode de mesure de référence de l'exposition des FS est réalisée selon la méthode METROPOL M-120 « Métaux et métalloïdes » qui est basée sur la gravimétrie dont seule la fraction inhalable est prise en compte.[10]

La VLEP fixée pour les FS est identique à celle fixée pour la fraction alvéolaire des poussières réputées sans effet spécifique (PSES).

Les PSES sont définies comme des poussières « qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou sur tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet qu'un effet de surcharge » (circulaire Direction générale du Travail (DGT) du 9 mai 1985).[11]

Or, une saisine de l'ANSES parue en 2019 propose un abaissement des VLEP des PSES à 0,9mg/m³ pour la fraction alvéolaire. [12]

Il est pertinent de s'interroger sur le niveau d'exposition des soudeurs à la fraction alvéolaire des FS.

La caractérisation de l'exposition des salariés à la fraction alvéolaire des fumées de soudage permettrait d'anticiper l'application de la nouvelle VLEP et de proposer des mesures de prévention à mettre en place pour la protection des salariés.

C'est le sujet de notre étude qui a été réalisée dans plusieurs entreprises réalisant des activités de soudage.

La première partie de ce document est centrée sur la formation, la composition et la toxicité des FS. Nous détaillerons les différents procédés de soudage et nous aborderons également la réglementation qui encadre les FS.

Dans un second temps, nous présenterons la méthodologie de repérage des expositions professionnelles aux FS. Puis nous détaillerons l'application de notre méthodologie aux entreprises sélectionnées et nous présenterons nos observations et notre interprétation des résultats obtenus. Enfin, nous discuterons d'éventuels axes d'amélioration identifiés.

I. État de l'art

1. Généralités sur les fumées de soudage

1.1 Définition des FS

Le soudage de métaux est un procédé qui permet d'assembler de façon permanente deux éléments métalliques. La jonction se fait en portant les bords des pièces à assembler à la température de fusion grâce à une source d'énergie. Cette opération peut être effectuée avec ou sans métal d'apport. [13]

Le soudage présente de nombreux avantages, il permet d'obtenir une continuité métallique de la pièce en lui conférant des caractéristiques (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité...) comparables à celles du métal. Il répond à des sollicitations élevées et permet d'assurer l'étanchéité de la pièce à souder. Il est durable et insensible aux variations de température et aux conditions climatiques.

Les différents procédés de soudage émettent, du fait des hautes températures atteintes au point de fusion, des fumées qui peuvent être inhalées par les opérateurs et les personnes travaillant à proximité. Ces fumées sont composées d'un mélange de gaz et de poussières. Elles peuvent, présenter des effets néfastes pour la santé et être à l'origine de pathologies professionnelles, selon leur composition, leur concentration et la durée d'exposition. [14]

1.2 Les différents procédés de soudage

Il existe près de 140 procédés différents de soudage. Seuls les 3 procédés les plus fréquemment utilisés actuellement seront décrits. Chaque procédé possède ses spécificités et est donc privilégié pour des applications particulières.

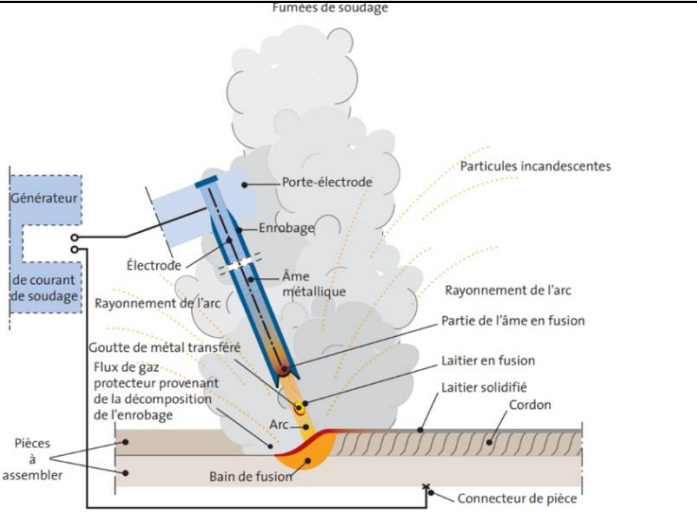
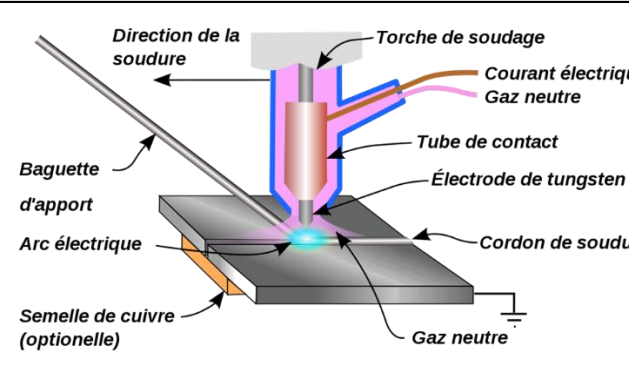
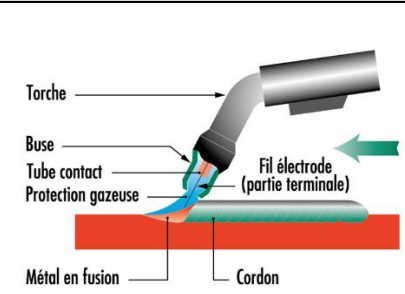
Les différents procédés de soudage manuels se divisent en deux familles, le soudage au gaz ou au chalumeau et le soudage à l'arc électrique.

Notre étude porte sur le soudage à l'arc électrique dont les principales techniques sont :

- Le soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée MMA (Manual Metal Arc)
- Le soudage à l'arc électrique type TIG, Tungsten Inert Gas, avec électrode tungstène réfractaire sous protection gazeuse
- Le soudage semi-automatique, avec fil électrode fusible Metal Inert Gas (MIG) et Metal Activ Gas (MAG)

Les principes de ces procédés seront présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Description des procédés de soudage les plus courants

MMA	TIG	MIG/MAG
 <i>Figure 1 : Fusion de l'électrode (soudage MMA) [15]</i> Le métal d'apport utilisé est la baguette. C'est une soudure autogène avec électrode enrobée, celle-ci consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d'apport (l'âme de l'électrode). Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée, elle est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un arc électrique qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense. La baguette fond dans le bain de fusion formant ainsi le cordon de soudure. Tandis que l'enrobage de l'électrode (laitier) fond à la température de l'arc et protège la soudure contre l'oxydation.[15]	 <i>Figure 2 :Schéma de transfert de métal avec soudage TIG [16]</i> La soudure TIG (Tungsten Inert) est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence (ou pas) d'un métal d'apport. L'arc se crée sous protection gazeuse entre l'électrode et la pièce à souder. La soudure TIG nécessite l'apport de métal, puisque l'électrode est non fusible. Le gaz est stocké dans une bouteille raccordée à la torche. Une électrovanne permet de contrôler le débit et la pression. Le poste à souder électrique TIG est un générateur relié à la pièce à souder par un câble.[17]	 <i>Figure 3 : Schéma de transfert de métal avec soudage MIG/MAG [18]</i> C'est un procédé de soudage semi-automatique qui permet la fusion des métaux grâce à l'énergie générée par un arc électrique. L'acronyme MIG désigne Metal inert gas tandis que MAG signifie Metal active gas, ce qui les différencie est la composition du gaz. En effet, le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu, contrairement au procédé MAG. Ce procédé est utilisé dans le cas où l'on rechercherait du rendement ou de fortes épaisseurs de cordons comme pour les charpentes métalliques. Le matériel requis est composé d'un poste à souder MIG-MAG avec un dévidoir continu de fil de soudage. Le gaz est conditionné dans des bouteilles qui sont reliées à la torche à souder.[19]

1.3 Caractérisation des fumées de soudage

1.3.1 La formation et l'émission des fumées de soudage

Les fumées de soudage sont émises lorsque le point de fusion atteint de hautes températures. Les températures supérieures à 4000 °C dans l'arc chauffent à la fois les pièces métalliques à assembler et le métal d'apport provenant du fil d'électrode consommable alimenté en continu dans la soudure. La plupart des matériaux contenus dans les FS proviennent de l'électrode consommable, qui est partiellement volatilisée au cours du processus de soudage, une petite fraction des fumées provient des particules projetées et du bain de fusion.[9]

Les fumées émises sont composées, en proportions variables, de gaz et de particules.

Les gaz émis lors du soudage peuvent provenir :

- Du gaz protecteur (argon, hélium, etc.),
- Du gaz émis par l'opération elle-même (monoxyde de carbone, ozone, etc.)
- Des gaz issus de la dégradation thermique ou photochimique de revêtements éventuellement présents sur les pièces (phosgène, formaldéhyde, etc.).

Ils contiennent en quantité variable du monoxyde de carbone (CO), des vapeurs nitreuses (dioxyde d'azote NO₂, monoxyde d'azote NO) et de l'ozone (O₃).

Lorsque la pièce à souder a précédemment été dégraissée avec des solvants chlorés, on peut également retrouver du phosgène (COCl₂).

Les FS sont principalement composées de particules solides métalliques et d'oxydes métalliques (oxydes de zinc, de cadmium, de chrome, d'aluminium et de fer, etc.) qui présentent un diamètre inférieur à 1 µm et peuvent même être plus généralement inférieur à 0,1 µm.

La fraction particulaire des FS provient essentiellement du métal d'apport. La nature des FS est extrêmement variée, on va retrouver notamment : l'aluminium, le nickel, le béryllium, le cadmium, le plomb, le chrome, le cobalt, le cuivre, l'étain, le fer, le zinc, le molybdène, le vanadium, le manganèse, le titane et la silice (dans l'enrobage des électrodes enrobées). [20]

1.3.2 La composition des fumées de soudage

La composition des FS ainsi que le débit d'émission peut varier en fonction de nombreux paramètres, dont certains sont liés entre eux, parmi lesquels :

- Le procédé de soudage ;
- Le diamètre du fil ou de l'électrode ;
- L'épaisseur et la composition de l'enrobage ou du flux (fils fourrés) ;
- La composition de l'électrode ou du fil ;
- Les paramètres de soudage : intensité, longueur d'arc, tension, vitesse de déplacement ;
- Le facteur de marche de l'installation (rapport du temps effectif de soudage au temps de soudage) ;
- La position de soudage : à plat, verticale montante, en angle... ;
- La nature de l'opération de soudage : rechargement ou assemblage ;
- La composition du gaz protecteur et son débit ;
- La composition du métal de base ;
- La présence de revêtements contenant du zinc, du cadmium, du plomb, etc. ou de contaminants sur le métal de base (traces de solvants, salissures, graisses, etc.).

Il est intéressant de noter que quatre-vingt-quinze pour cent des constituants des fumées de soudage proviennent des produits d'apport et moins de cinq pour cent proviennent du matériau de base. [9]

Plusieurs constituants des fumées émis lors du soudage des métaux peuvent être responsables d'effets sur la santé d'où la préoccupation en santé au travail du soudage.

2. Effets sur la santé

2.1 Devenir des particules chez l'homme

2.1.1 Dépôt des particules inhalées dans l'arbre respiratoire

Les effets sur la santé des soudeurs peuvent être difficiles à étudier en raison des variations dans le milieu de travail et de l'exposition à divers aérosols générés par différents procédés. Les soudeurs peuvent travailler dans des espaces ouverts et bien ventilés ou des espaces confinés et mal ventilés. Chaque situation de soudage présente son propre risque potentiel pour la sécurité et la santé.

En fonction du type de métal soudé, les effets pathologiques identifiés sont différents. Par exemple, il a été démontré par une étude menée par Sobaszek en 2000, que l'exposition

aux fumées issue du soudage de l'inox provoquait des diminutions plus significatives des fonctions pulmonaires (après 20 ans de soudage) que celles issue d'acier doux.[21]

La toxicité des fumées de soudage est influencée par leur composition chimique, mais également par la taille des particules qui les composent qui va conditionner leur déposition dans l'arbre respiratoire (figure 4) et ainsi jouer un rôle important dans leur comportement et leurs effets sur la santé.

Le système respiratoire se divise en trois zones : les voies aériennes supérieures, l'arbre trachéobronchique et la région alvéolaire.

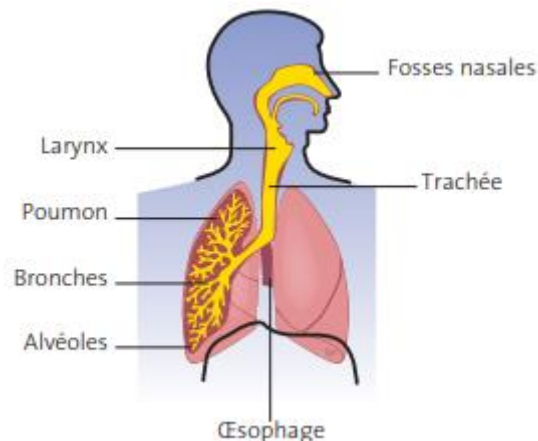


Figure 4 : Les différentes régions du système respiratoire [9]

Lorsque les particules sont inhalées, au voisinage des voies respiratoires, elles se déposent le long des voies aériennes. Elles peuvent alors avoir une action locale (irritation) ou à distance selon leurs caractéristiques physico-chimiques d'ensemble (forme, espèces chimiques, solubilité, propriétés de surface, ...). La norme NF EN 481 définit plusieurs fractions granulométriques des particules en suspension dans l'air en lien avec leur pénétration dans l'arbre respiratoire, ainsi que les conventions d'échantillonnage de ces fractions.

Les trois principales fractions conventionnelles sont la fraction inhalable, thoracique et alvéolaire.

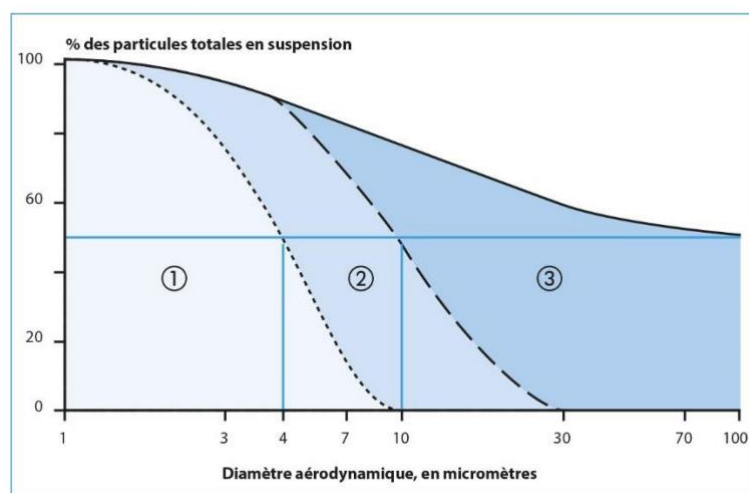


Figure 5: Représentation des fractions conventionnelles : ① : alvéolaire ; ① + ② : thoracique ; ① + ② + ③ : inhalable [22]

La figure 5 illustre les fractions conventionnelles, elles sont représentées par les zones que délimitent les courbes : la zone ① représente la fraction alvéolaire ; les zones ① et ② forment la fraction thoracique, enfin les zones ① , ② et ③ représentent la fraction inhalable. La fraction inhalable représente la fraction massique de particules en suspension dans l'air pouvant pénétrer dans l'organisme par la bouche et le nez et se déposer dans les voies respiratoires, elle comprend des particules dont le diamètre aérodynamique peut atteindre 100 μm .

La fraction thoracique, concerne la fraction massique de particules qui, une fois inhalées, peuvent pénétrer au-delà du larynx ; elle comprend des particules dont le diamètre aérodynamique peut atteindre 30 μm .

Enfin, la fraction alvéolaire désigne la fraction massique de particules qui, une fois inhalées, peuvent pénétrer jusqu'aux alvéoles pulmonaires, elle comprend des particules dont le diamètre aérodynamique peut atteindre 10 μm . [22]

Lors des travaux de soudage, les particules émises ont un diamètre aérodynamique inférieur à 1 μm . De ce fait, la fraction alvéolaire joue un rôle central du point de vue des effets sur la santé des FS. [9]

2.1.2 Mécanisme de défense pulmonaire

Les premiers organes affectés par l'inhalation des FS sont les poumons. Leur rôle est de distribuer l'oxygène dans le sang et d'évacuer le dioxyde de carbone (CO_2) qui s'y est accumulé. L'air pénètre par la trachée et se dirige vers les bronches, qui se ramifient en bronchioles (petites bronches) dont les extrémités forme des petits sacs à paroi très mince appelés les alvéoles. C'est dans les alvéoles, à travers cette membrane fine, que l'échange gazeux se produit.

Le système respiratoire possède des mécanismes de défense qui contribuent à éliminer certaines substances indésirables lorsque la concentration et la toxicité des produits sont élevées. Du nez jusqu'aux bronches, les voies respiratoires sont tapissées de cellules ayant pour fonction de sécréter une substance collante, le mucus, qui sert à retenir les poussières. [23]

De plus, les battements des cils microscopiques situés dans le pharynx, dans les bronches et dans les bronchioles permettent de faire dégager les poussières agglutinées dans le

mucus. Les particules de taille grossières sont ainsi éliminées des voies respiratoires notamment par la toux et les expectorations.

Les particules plus fines (comme celles constituant les FS), ont la capacité d'atteindre les alvéoles et de s'y déposer.[23]

Dans l'alvéole, les particules sont prises en charge par les macrophages qui vont être éliminés par phagocytose. Si les particules sont insolubles ou toxiques pour les phagocytes, l'organisme va tenter d'isoler l'agresseur en produisant du tissu cicatriciel qui entoure ces particules. Ce qui va être à l'origine de la fibrose pulmonaire, laquelle peut nuire aux échanges gazeux et réduire la capacité du poumon à oxygéner l'organisme.[24]

2.2 Exposition aiguë

2.2.1 Irritation

Les différents gaz, tels que les oxydes d'azote et l'ozone, et certaines fumées métalliques, dégagés par le soudage, tels que le béryllium ou le cobalt sont très irritants pour les voies respiratoires. Cette irritation se manifeste par l'essoufflement, la toux et des difficultés respiratoires. [25]

2.2.2 Fièvre des soudeurs

La fièvre des fumées métalliques est une maladie principalement causée par l'exposition aux oxydes métalliques d'Al, Zn, etc. présents dans les FS. Les symptômes de la fièvre des fumées métalliques sont similaires à la fièvre commune, de ce fait le diagnostic de la maladie ne peut être fait que par leur atmosphère de travail. La fièvre des fumées métalliques dure généralement de 24 à 48 h avec transpiration et frissons, maux de tête, jambes endolories, étourdissements, maux de gorge, toux, nez bouché et essoufflement.[26] [27]

D'autres facteurs dont la taille des particules des fumées inhalées semblent également influencer sur les risques encourus pour la santé lors du soudage. Les rapports de Wardhana et son équipe indiquent que les particules de fumée de taille inférieure à 1 µm provoquent de graves désordres systémiques. [28]

2.3 Exposition chronique

2.3.1 Troubles respiratoires

2.3.1.1 Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO)

Les fumées de soudage sont soupçonnées de favoriser le déclin de la fonction respiratoire et le développement de la BPCO.

La bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) est une maladie caractérisée par une limitation persistante du débit d'air qui est généralement progressive et associée à une réponse inflammatoire chronique accrue aux particules ou aux gaz nocifs dans les voies respiratoires et les poumons. [29]

Selon un rapport de l'American Thoracic Society (ATS) les facteurs professionnels et environnementaux contribueraient à 15 % des cas de BPCO, ainsi qu'à l'augmentation de la mortalité par BPCO.[30]

Une enquête coréenne menée par Koh et son équipe, a étudié la relation entre l'exposition aux FS et la BPCO chez les soudeurs des chantiers navals coréens. Les résultats ont confirmé une association entre les expositions aux FS (mesure moyenne de 7,7 mg/m³) et une augmentation du risque de BPCO. [31]

Afin d'évaluer la relation entre la concentration des fumées de soudage et l'altération du système bronchopulmonaire, une étude a été réalisée en Iran par Kakoei et coll. dans une entreprise de fabrication automobile.

Les résultats ont montré une prévalence croissante des troubles respiratoires, la diminution des paramètres de la fonction pulmonaire chez les soudeurs et l'apparition de bronchite chronique.[32]

Les résultats de l'étude menée par l'équipe de Minov appuient les données trouvées sur la relation entre l'exposition au soudage sur le lieu de travail et la BPCO.

En effet, cette étude transversale a montré une prévalence plus élevée de symptômes respiratoires chez les soudeurs. La majorité des symptômes respiratoires chroniques chez les soudeurs étaient liés au travail. La prévalence de la BPCO était significativement plus élevée chez les soudeurs par rapport aux employés de bureau.[33]

2.3.1.2 Cancer Broncho-Pulmonaire (CBP)

En 1990, le centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé les fumées de soudage dans le groupe 2B, l'agent est peut-être cancérigène pour l'homme, causant de graves dommages au système respiratoire.[4]

Le CIRC a revu le classement (monographie 118) en 2017, et les FS ont été intégrées dans le groupe 1 (l'agent est cancérigène avéré pour l'homme), principalement pour le cancer du poumon provoqué par les fumées, et pour le mélanome oculaire, un type de cancer des yeux, provoqués par les radiations UV (monographie 118).[5]

Les FS ne sont pas classées par l'Union européenne, en revanche, plusieurs de ses constituants tels que le chrome VI, le nickel, le béryllium, etc. sont classés CMR par l'Union européenne.

L'étude ICARE a permis d'étudier le rôle des facteurs de risques professionnels et environnementaux dans la survenue de cancers bronchopulmonaires (CBP) et de cancers des voies aérodigestives supérieures dans une étude cas-témoins.

Cette étude a établi que le risque de survenue de cancer broncho-pulmonaire (CBP), associé à l'exposition aux fumées de soudage, est augmenté de 60 % chez les soudeurs de métiers comparé à des sujets n'ayant jamais été exposés aux FS.

Fait intéressant, lorsque les pièces à souder sont recouvertes de peinture ou de graisse (quel que soit le produit utilisé), il y a un risque environ 3 fois plus élevé de survenue de CBP. [34]

Deux études cas-témoins canadienne sur des soudeurs à l'arc ont montré un excès de risque de CBP lié à l'exposition aux FS. [35]

Une cohorte avec un long suivi et des estimations quantifiées de l'exposition individuelle aux particules des FS a été menée par Sørensen et son équipe corrobore les constatations antérieures selon lesquelles les soudeurs ont un risque accru de cancer du poumon. [36]

La méta-analyse d'études cas-témoins et de cohorte d'Honaryar, basée sur le soudage ou l'exposition aux fumées de soudage et le risque de cancer du poumon, a montré que l'exposition aux fumées de soudage augmentait le risque de cancer du poumon, quel que soit le type d'acier soudé ou la méthode de soudage et en prenant en compte l'exposition à l'amiante ou au tabagisme. [37]

2.3.2 Autres effets

Des questions ont été soulevées au sujet d'une association causale possible entre les effets neurologiques chez les soudeurs et la présence de manganèse dans les fumées de soudage. Il a été démontré que l'inhalation de manganèse pur à fortes doses provoque des effets neurologiques chez les travailleurs exposés. Cependant, le manganèse n'est pas présent en tant qu'élément pur dans les fumées de soudage. Il est complexé avec d'autres métaux et peut ne pas produire les mêmes effets sur la santé que le manganèse pur.

Plusieurs cas de surexposition au manganèse ou de « manganisme » chez les soudeurs ont été signalés dans la littérature. Le manganisme est un syndrome neurologique caractérisé par des anomalies du système nerveux central et des perturbations neuropsychiatriques, on dit souvent qu'il est similaire à la maladie de Parkinson.[38]

Les fumées de soudages sont également un facteur de risque important de cancer du rein. Des associations positives entre les soudeurs et des atteintes rénales ont été signalées dans de nombreuses études, notamment du fait de la présence de cadmium.[39]

De plus, des études ont montré que tout comme le rayonnement UV du soleil, le rayonnement UV issu du processus de soudage peut contribuer à l'apparition de cancer de la peau. Le cou et la région adjacente (souvent non protégée) sont particulièrement exposés chez les soudeurs. Emmett et son équipe ont signalé la prévalence des troubles de la peau et des yeux chez les soudeurs.[40] [41]

Plusieurs études suggèrent que le soudage est préjudiciable au système reproducteur masculin imputant les FS et la chaleur rayonnante. [42]

Il est important de noter que l'état d'oxydation des différents métaux présents dans les fumées de soudages va conditionner leur toxicité. C'est le cas par exemple du chrome, le Cr^{3+} sera moins toxique du fait de sa faible biodisponibilité comparé au Cr^{6+} .

3. Le contexte réglementaire

3.1 La prévention du risque chimique

Les règles générales de prévention du risque chimique sont établies par les articles R. 4412-1 à R. 4412-57 du Code du travail, dans le cas des fumées de soudage, elles doivent être appliquées.

Des règles particulières de prévention, prescrites par les articles R. 4412-59 à R. 4412-93 du Code du travail, doivent également être mises en œuvre lors de toute opération exposant à un agent cancérigène, mutagène ou toxique pour la reproduction de catégorie 1A ou 1B. Ces règles spécifiques sont explicitées dans la circulaire DRT n°12 du 24 mai 2006.[2]

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) classe les fumées de soudage (et les rayonnements UV issus des opérations de soudage) dans la catégorie 1, agents cancérigènes avérés pour l'homme.

De nombreuses observations et études (dont plus de 20 études cas-témoins et près de 30 études de cohortes) ont permis de démontrer le caractère avéré du potentiel cancérigène des fumées de soudage.

De plus, plusieurs polluants émis lors de travaux de soudage sont également classés cancérigènes par l'Union européenne et/ou par le Centre international de recherche sur le cancer. [43]

Le tableau 2 reprend la classification européenne et la classification du CIRC pour les principaux agents cancérigènes rencontrés lors des activités de soudage.

Tableau 2: La classification des principaux agents cancérigènes rencontrés lors des activités de soudage [43]

Agents cancérigènes	Union européenne	CIRC
Béryllium, oxyde de béryllium	1B par inhalation	1
Cadmium	1B	1
Chrome VI	1A	1
Cobalt	–	2B
Dioxyde de titane	–	2B
Formaldéhyde ²	2	1
Nickel	2	2B
Certains composés du nickel : oxyde de nickel, dioxyde de nickel, etc.	1A par inhalation	1
Pentaoxyde de vanadium	–	2B
Plomb	2 (composés du plomb)	2B (métal) 2A (dérivés inorganiques)
Rayonnements ionisants alpha (thorium)	–	1

3.2 Les valeurs limites d'exposition professionnelle

Afin de protéger la santé des travailleurs, il existe des niveaux de concentration de polluants dans l'atmosphère des lieux de travail à ne pas dépasser sur une période de référence.

Ce sont les **valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)** qui sont fixées par le ministère chargé du Travail (quelques valeurs sont également recommandées par la Caisse nationale de l'assurance maladie (CNAM)) dans le dessein de préserver la santé des travailleurs. Les VLEP représentent un important outil de réduction du risque chimique sur les lieux de travail.

Ces valeurs peuvent être de deux types : **contraignantes** si elles sont fixées par décret ou, **indicatives**, si elles sont fixées par arrêté.

Dans le cas des VLEP contraignantes, le respect des valeurs seuil est une obligation minimale pour l'employeur. Leur non-respect expose à des sanctions.

Les VLEP indicatives sont des valeurs réglementaires établissant un objectif minimal de prévention à atteindre.

Les VLEP recommandées par l'ANSES sont des concentrations dans l'air d'une substance chimique que peuvent respirer les travailleurs pendant un temps déterminé, sans entraîner d'effets néfastes pour leur santé, en l'état des connaissances au moment de l'expertise. Les niveaux sont déterminés en considérant que la population exposée (les travailleurs) est homogène, ne comprenant ni enfants ni personnes âgées.

Pour déterminer les niveaux de concentration, des études **humaines** (études épidémiologiques, cliniques) ou des études **expérimentales animales** (études toxicologiques) sont effectués. [8]

Trois types de valeurs limites d'exposition en milieu professionnel sont recommandées, pour une substance donnée :

- Une **Valeur Limite d'Exposition Professionnelle-8 heures (VLEP-8h)**, qui a pour objectif de protéger, à moyen et long terme, la santé des travailleurs régulièrement exposés à l'agent chimique considéré, et ce pendant la durée d'une vie de travail.
- Une **Valeur Limite d'exposition à Court Terme (VLCT-15 min)** qui vise à protéger les travailleurs des effets néfastes (effets toxiques immédiats ou à court terme tels que des phénomènes d'irritation) sur la santé dus à des pics d'exposition.
- Une **Valeur plafond** : il s'agit de la limite de concentration atmosphérique d'un agent chimique dans la zone de respiration d'un travailleur, qui ne doit être dépassée à aucun moment de la période de travail. Elle concerne principalement les agents

reconnus comme irritant fort ou corrosif ou pouvant causer un effet grave, potentiellement irréversible, à très court terme. [44]

Ces trois types de valeurs sont exprimés soit **en mg.m^{-3}** , c'est-à-dire en milligrammes d'agent chimique par mètre cube d'air et en ppm (parties par million), c'est-à-dire en centimètres cube d'agent chimique par mètre cube d'air, pour les gaz et les vapeurs ; soit **en mg.m^{-3}** uniquement, pour les aérosols liquides et solides ; soit **en fibres par cm^3 (f.cm^{-3})** pour les matériaux fibreux.[45]

Les VLEP désignent les seuils de concentration qui ne doivent jamais être dépassés dans l'air inhalé par un travailleur. Ces valeurs découlent des données scientifiques actuelles dont disposent les spécialistes sur la toxicité des polluants. Cependant, elles ne sauraient constituer une garantie de ne pas développer une pathologie. Ainsi ces valeurs limites représentent un objectif minimal, il convient de choisir des pratiques et des équipements visant à abaisser les niveaux d'exposition à des valeurs aussi basses que possible.

3.3 VLEP des fumées de soudage

La valeur limite d'exposition professionnelle sur huit heures, en France, pour la totalité des particules composant les fumées de soudage est de **5 mg/m^3** . Les VLEP de chaque constituant des fumées doivent également être respectées. [7]

Tableau 3: Les VLEP des principaux polluants rencontrés lors de travaux de soudage [43]

* Réglementation indicative ** Réglementation contraignante (Valeurs limites d'exposition mesurées sur une durée maximale de 8 heures / valeurs limites d'exposition à court terme mesurées sur une durée maximale de 15 minutes)

Polluants	VLEP (mg/m^3)
Aluminium (fumées de soudage)	5
Aluminium (Al_2O_3)	10
Azote (dioxyde)	6
Azote (monoxyde)	30
Baryum (composés solubles)	0,5*
Béryllium (et composés)	0,002
Cadmium (oxyde)	0,05
Chrome VI (composés du)	0,001/0,005**
Cuivre (fumées)	0,2
Cyanure d'hydrogène	2 / 10**
Dioxyde de titane	10
Fer (Fe_2O_3 , fumées)	5
Fluorures	2,5*
Manganèse (Mn_3O_4 , fumées)	1
Monoxyde de carbone	55
Nickel (oxyde et trioxyde)	1
Ozone	0,2 / 0,4
Phosgène	0,08 / 0,4**
Plomb (métallique et composés)	0,1**
Vanadium	0,05
Zinc (oxyde, fumées)	5

Le tableau 3 présente les VLEP des principaux polluants rencontrés lors de travaux de soudage. Les valeurs en bleu représentent les limites d'exposition mesurées sur une durée maximale de 8 heures, tandis que les valeurs en violet représentent les limites d'exposition à court terme mesurées sur une durée maximale de 15 minutes.

Comme énoncé précédemment, les FS ont la même VLEP que les PSES qui va prochainement diminuer fortement à la suite des dernières études scientifiques. Les FS sont majoritairement constituées de particules fines et ultrafines, c'est pourquoi nous avons souhaité quantifier les poussières alvéolaires afin de comparer la concentration obtenue à la VLEP proposée par l'ANSES. De plus, il est important de noter que les FS restent des composées CMR et que le risque ne doit pas être sous-estimé.

La caractérisation de l'exposition des salariés à la fraction alvéolaire des fumées de soudage permettrait d'anticiper l'application de la nouvelle VLEP et de proposer des mesures de prévention à mettre en place pour la protection des salariés.

C'est le sujet de notre étude qui a été réalisée dans plusieurs entreprises réalisant des activités de soudage.

II. Matériels et méthodes

1. Étude de situation

1.1 Sélection des entreprises

Les sujets traités par les toxicologues dépendent des demandes des médecins du travail. Parmi les demandes d'intervention reçues par les toxicologues sur la durée de mon contrat, les entreprises entrant dans la problématique de notre étude ont été sélectionnées.

Les domaines d'activité de ces entreprises sont différents, mais elles ont en commun la réalisation d'activités de soudage suffisamment conséquentes pour exposer leurs salariés aux polluants émis.

L'entreprise 1 est une carrosserie industrielle, l'entreprise réalise des créations sur mesure : véhicules frigorifiques, fourgons ou rideaux coulissants.

L'entreprise 2 réalise des travaux de forage, de sondages et de construction de puits.

L'entreprise 3 est spécialisée dans la fabrication de machines agricoles et forestières.

Enfin, l'entreprise 4 a essentiellement une activité de chaudronnerie et est spécialisée dans le coffrage béton.

1.2 Identifier le type de procédé mis en œuvre et les substances potentiellement présentes

1.2.1 Pré-visite

Cette première visite permet de rencontrer les responsables de l'entreprise et de collecter en amont les informations et les documents qui seront utiles pour caractériser l'exposition des salariés.

Lors de la pré-visite, une préanalyse des postes est effectuée. Cette dernière permet d'observer l'environnement de travail de l'employé. Contrairement à l'étude de poste, tous les procédés ne sont pas observés sur une durée de travail et en temps réel. Cette étape reste néanmoins indispensable pour la construction des groupes de travailleurs exposés de façon similaire (GES) ou groupes d'exposition homogène (GEH) selon l'ancienne terminologie. L'annexe 1 est un logigramme qui illustre le cheminement de pensée engagé.

1.2.2 Construction des GEH

Pour évaluer l'exposition des travailleurs aux fumées de soudage et conclure avec certitude que la concentration en polluants mesurée ne dépasse pas la VLEP, il faudrait idéalement

mesurer l'exposition de chaque travailleur dans une entreprise et pour chaque jour de travail. Cette approche n'est pas possible en raison des difficultés techniques de mise en œuvre et des coûts qui en résultent. Il est nécessaire de recourir à une stratégie de prélèvement qui utilise un nombre limité de mesures effectuées dans des conditions représentatives des activités normales d'un groupe de travailleurs exposés de façon similaire (GES – ou groupe d'exposition homogène : GEH). Si les mesures d'exposition réalisées sur quelques travailleurs d'un GEH indiquent un non-dépassement de la VLEP, alors cette conclusion s'applique à tous les travailleurs du GEH.

Durant cette étape, on repère les postes et travail et les salariés sur lesquels la caractérisation de l'exposition est pertinente. On effectue notamment une analyse de la configuration du poste (annexe 2), une analyse du procédé de travail (annexe 3) et une analyse des scénarios d'exposition (annexe 4).

1.2.3 Recueil et analyse des fiches de données de sécurité

La Fiche de Données de Sécurité (FDS) est un document qui fournit à l'utilisateur, pour un produit chimique donné, un nombre important d'informations complémentaires de base concernant la sécurité, la santé et l'environnement.

Les FDS sont analysées dans le but d'identifier la composition :

- Des fumées de soudage.
- Des revêtements des pièces à souder ou pour le dégraissage des pièces.
- Des produits utilisés pour des tâches annexes (bombe anti-grattons...).

L'annexe 5 est un logigramme qui reprend les étapes à effectuer pour recueillir les fiches.

La FDS est un support irremplaçable pour l'évaluation du risque chimique dans l'entreprise et pour la détermination des mesures de prévention à prendre, à tous les stades de la vie d'un produit donné.

Elle est également le bon support d'information pour la rédaction des notices de postes prévues à l'article R4412-39 du Code du Travail. C'est au chef d'établissement que revient la responsabilité de détenir et de transmettre les FDS des produits utilisés dans son établissement au médecin du travail (Article R4624-4-1 du Code du Travail). [46]

En termes de prévention, la démarche la plus cohérente est qu'aucun produit chimique ne pénètre dans l'entreprise sans être accompagné de sa FDS. Les FDS doivent être régulièrement remises à jour, en raison de la réévaluation régulière de l'étiquetage et du caractère de dangerosité des substances chimiques par l'Union européenne (adaptation au progrès technique).

2. Campagne de mesurage et analyse des résultats

2.1 Métrologie atmosphérique

2.1.1 Intérêt de la métrologie atmosphérique

En milieu de travail, l'inhalation est la voie d'exposition la plus importante. La métrologie atmosphérique, permet de caractériser objectivement la pollution aux postes de travail.

Il est important de préciser que les mesures effectuées ne sont que le reflet d'une exposition à un moment donné. Elles sont par conséquent soumises aux variabilités extérieures (manière de manipuler, conditions météorologiques, type d'activité...).

2.1.2 Stratégies de prélèvements

L'objectif de la métrologie atmosphérique est d'estimer les variations d'exposition d'un ensemble de travailleurs au cours d'une journée de travail. Elle permet de détecter les étapes les plus polluantes d'un procédé afin de proposer des actions correctives.

Le médecin du travail peut demander des mesures :

- Pour estimer l'exposition de travailleurs sur l'ensemble de l'année.
- Pour donner suite à des effets sur la santé constatés chez les salariés à certains postes.

La stratégie de prélèvements définit l'ensemble des agents chimiques concernés ainsi que les moyens à mettre en œuvre pour la mesure de l'exposition. Il faut prendre en compte toutes les données utiles telles que les résultats de l'évaluation des risques chimiques réalisée par l'employeur, toutes les mesures effectuées antérieurement dans l'entreprise, en interne, par les laboratoires des Caisse Régionale d'Assurance Maladie (CRAM), Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (CARSAT), et autres organismes de contrôle.

Les objectifs étant de :

- Confirmer la présence ou l'absence d'un polluant.
- Identifier des phases de travail particulières.
- Contrôler la VLEP.
- Sensibiliser les salariés à l'intérêt du port du masque.
- Prioriser une zone ou un poste à caractériser.
- Cartographier les polluants.

La stratégie de prélèvements consiste à répondre aux questions suivantes pour chaque GEH :

- QUOI ? Quelles substances chimiques en fonction de la VLEP (8 heures et/ou court terme) sont à contrôler ?
- OÙ ? Localisation des échantillonnages, choix des postes de travail ;
- COMBIEN ? Nombre de prélèvements à effectuer ;
- QUAND ? À quel moment de la journée et la durée du prélèvement.

En fonction des situations de travail observées et analysées pour chaque entreprise, les stratégies de prélèvements suivantes ont été proposées :

2.1.2.1 Stratégie entreprise 1

Fumées de soudage (gravimétrie + identification des métaux)

Prélèvements individuels :

- Prélèvement sur le poste de soudage marbre principal et le poste de soudage marbre suite confection châssis sur supports adaptés par pompage actif pendant une journée de travail type de l'opérateur.

Poussières fraction alvéolaire

Prélèvements individuels :

- Prélèvement sur le poste de soudage marbre principal et le poste de soudage marbre suite confection châssis sur supports adaptés par pompage actif pendant une journée de travail type de l'opérateur.

La campagne de mesures atmosphériques est réalisée afin d'évaluer l'exposition professionnelle des soudeurs travaillant aux postes marbre et suite confection châssis.

En parallèle de ces mesures, des prélèvements surfaciques ont été effectués à visée pédagogique :

- Mains opérateur principal début de poste.
- Mains opérateur principal avant la pause.
- Mains opérateur suite confection début de poste.
- Mains opérateur suite confection avant la pause.
- Volant de voiture d'un salarié.

2.1.2.2 Stratégie entreprise 2

Fumées de soudage (gravimétrie + identification des métaux)

Prélèvement individuel :

- Prélèvement sur cassettes par pompage actif sur le mécanicien réalisant des activités de soudage sur l'intégralité du poste de travail pour une comparaison à la VLEP 8H.

Poussières fraction alvéolaire

Prélèvement individuel :

- Prélèvement sur cassettes par pompage actif sur le mécanicien réalisant des activités de soudage.

Le mécanicien présent dans l'entreprise procède a de nombreuses activités de soudage. Une campagne de mesure a été proposée dans les locaux concernant le mesurage des FS et leur composition en métaux afin de contrôler son exposition. Les mesures ont été réalisées sur une fraction représentative de la durée du poste de travail.

2.1.2.3 Stratégie entreprise 3

Fumées de soudage (gravimétrie + identification des métaux)

Prélèvements individuels :

Les prélèvements atmosphériques seront réalisés sur cassettes par pompage actif sur l'intégralité du poste de travail pour une comparaison à la VLEP 8H :

- o Sur 1 opérateur pointeur (pas de torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (2 opérateurs travaillent dans le box avec torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (avec torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (sans torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (travail sur table aspirante).

Poussières fraction alvéolaire

Prélèvements individuels :

Les prélèvements atmosphériques seront réalisés sur cassettes par pompage actif :

- o Sur 1 opérateur pointeur (pas de torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (2 opérateurs travaillent dans le box avec torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (avec torche aspirante) ;
- o Sur 1 opérateur soudeur (sans torche aspirante) ;

- Sur 1 opérateur soudeur (travail sur table aspirante).

Sur 14 postes de soudeurs, 5 GES ont été identifiés. Nous avons placé les capteurs sur 5 soudeurs pour mesurer la fraction de polluants auxquels les salariés sont exposés.

2.1.2.4 Stratégie entreprise 4

Fumées de soudage (gravimétrie + identification des métaux)

Prélèvements individuels :

- Prélèvements sur quatre soudeurs + le chef d'atelier.

Poussières fraction alvéolaire

Prélèvements individuels :

- Prélèvements sur trois soudeurs.

Les prélèvements ont été réalisés en individuel sur les 4 soudeurs de l'entreprise. Sur 3 des 4 soudeurs, nous avons placé un capteur pour la mesure de la fraction alvéolaire des poussières, mais pas sur le dernier car celui-ci n'était pas censé souder le jour des prélèvements, car il est en formation pour devenir chef d'atelier. Les mesures réalisées sur le chef d'entreprise avaient vocation de pédagogie. En effet, il passe beaucoup de temps dans l'atelier et effectue régulièrement du soudage. Il était important de lui prouver qu'il pouvait aussi être exposé aux fumées de soudage et lui suggérer une protection adaptée.

Pour répondre à l'objectif de notre étude, il était intéressant de réaliser des prélèvements conjoints de poussières fraction inhalable et alvéolaire afin d'observer les différences de concentrations mesurées entre les deux fractions collectées.

2.1.2 Matériels utilisés

Il existe différentes techniques de prélèvements atmosphériques permettant l'évaluation de la concentration atmosphérique d'un polluant.

La caractérisation de l'exposition des salariés a été réalisée par pompage actif. Cette technique a été privilégiée pour les avantages qu'elle présente tels que la possibilité :

- D'utiliser les résultats de mesure pour le contrôle des VLEP-8h et des VLCT-15min.
- De réaliser des relevés d'ambiance ou individuel selon les modèles de pompes.
- De faire varier la durée de prélèvement.
- D'ajuster les débits.
- D'utiliser des supports différents selon les substances.

Nous avons utilisé le matériel suivant :

- Pompes de prélèvement APEX 2 PRO de CASELLA et un débitmètre D5L d'ATC pour le réglage et la vérification du débit.

(Dernier étalonnage et dernière calibration du matériel date de : 2020 pour le débitmètre D5L et les pompes de prélèvement APEX 2 PRO)

- Des cassettes membrane quartz tarées pour collecter les fumées de soudage.
- Des tuyaux souples de connexion pompe-échantillonneur.
- Des lingettes Ghost-Wipes pour les prélèvements surfaciques.

L'annexe 6 permet de visualiser le matériel utilisé.

2.1.3 Méthodes

Les mesures quantitatives de fumées de soudage et de recherche de métaux sont basées sur les méthodes de référence de la base de données METROPOL de l'INRS (Institut National de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) :

- Aérosols en fraction inhalable pour les fumées de soudage : Méthodes METROPOL M-274. [47]
- Métaux et métalloïdes pour le screening métaux : Méthodes METROPOL M-278.[48]
- Aérosols en fraction alvéolaire : Méthodes METROPOL M-122. [49]

Pour évaluer la concentration atmosphérique d'un polluant, le principe consiste à le prélever et le fixer sur un support adapté puis à déterminer la quantité recueillie en laboratoire par analyse.

Pour le prélèvement de la pollution particulaire inhalable, le dispositif consiste à faire passer l'air à l'aide d'une pompe au travers d'un média filtrant de porosité connue (filtre en fibres quartz) afin de recueillir les particules. La détermination de la masse d'aérosol se fait par différence entre la masse du filtre vierge et la masse du filtre après prélèvement.

Le filtre est ensuite analysé par spectrométrie d'émission atomique à plasma pour le couplage inductif afin de quantifier les métaux et métalloïdes présents dans les fumées collectées.

Afin de mesurer l'exposition des salariés aux fumées, le débit d'aspiration des pompes a été fixé à environ 2 L/min pour la fraction inhalable et 1.5 L/min pour la fraction alvéolaire. Les résultats obtenus seront alors calculés en fonction du débit d'aspiration de la pompe et

de la durée du prélèvement.

Le prélèvement d'air (avec les pompes) doit être réalisé au plus près des voies respiratoires des salariés.

L'ensemble des tâches effectuées par l'opérateur, leurs localisations spatiales et temporelles doivent être renseignées.

2.1.4 Laboratoire d'analyses

Les prélèvements effectués au sein de l'entreprise sont transmis au laboratoire de la Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé Au Travail (CARSAT), qui a un laboratoire Interrégional de Chimie et Toxicologie (LICT) situé à Villeneuve d'Ascq.

Les analyses sont réalisées gratuitement par le LICT grâce à une convention établie avec Action Santé Travail (AST) qui est un service de santé au travail et après accord de l'entreprise. En annexe 7, se trouve le document transmis à l'entreprise 1 concernant le choix du laboratoire et la transmission de la stratégie de prélèvement.

2.2 Étude de postes

Pour chaque entreprise, une étude de poste a été réalisée afin d'observer le travail réel des salariés sur leur poste de travail au cours des prélèvements. L'observation précise de l'activité, des procédés, des tâches potentiellement exposantes, de l'environnement de travail et de son organisation, des EPC et des EPI permettra d'interpréter les résultats des mesures et de délivrer les préconisations et le message de prévention les plus adaptés à l'activité des salariés.

3. Analyse et interprétation des résultats

3.1 Rappel des VLEP fumées de soudages

Les VLEP utilisées pour l'interprétation des résultats de mesures sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4: Valeurs limites d'exposition professionnelle des FS et des PSES

	Fumées de soudage (mg/m ³)	PSES fraction inhalable (mg/m ³)	PSES fraction alvéolaire (mg/m ³)
VLEP applicable	5	10	5
Proposition ANSES	/	4	0,9

L'ANSES propose dans la saisine référencée 2017-SA-0148, la fixation de nouvelles VLEP-8H pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES). [12]

- Une valeur de 4 mg/m³ pour la fraction inhalable (valeur seuil déterminée à partir des données d'une étude chez l'Homme pour l'augmentation de l'incidence d'environ 5% de la bronchite chronique).
- Une valeur de 0,9 mg/m³ pour la fraction alvéolaire (Valeur seuil déterminée à partir de plusieurs études chez le rat).

3.2 Démarche retenue pour l'interprétation des résultats

L'objectif de la démarche est de pouvoir juger si potentiellement, chaque jour, on est dans une situation où l'exposition est inférieure ou supérieure à la VLEP.

Si le mesurage donne des résultats supérieurs à la VLEP, on doit envisager des mesures de prévention. En revanche, si le mesurage est inférieur à la VLEP, il faut être certain, du fait de la variabilité de l'exposition, que ces résultats sont bien représentatifs de la situation de tous les jours et que la VLEP n'est pas parfois dépassée.

Pour établir un diagnostic de non-dépassement de la VLEP, l'arrêté du 15 décembre 2009 relatif aux contrôles techniques des VLEP sur les lieux de travail précise qu'au moins 3 mesures doivent mettre en évidence des résultats inférieurs à 0,1 x VLEP. C'est donc ce seuil de 0,1xVLEP qui a été choisi pour pouvoir confirmer l'absence de risque de dépassement de la VLEP.[51]

Le tableau suivant reprend la démarche d'interprétation retenue dans la présente étude :

Tableau 5: Démarche d'interprétation des résultats de métrologie (Document interne à AST)

Ratio de caractérisation du risque R (C/VLEP)	Diagnostic
$R < 0.1$	VLEP est vraisemblablement respectée
$0.1 < R < 0.3$	Nécessité de mesures supplémentaires pour affiner le diagnostic
$0.3 < R < 1$	Mesures de prévention à mettre en place
$R > 1$	La VLEP est dépassée. Mise en place de mesures correctives immédiates
CMR	Le calcul de ratio n'est pas pertinent pour ce composé. Il convient d'éliminer le risque à la source.

Ce tableau permet d'avoir une première approche des actions à réaliser.

III. Résultats

1. Étude de situation

Afin de répondre à la problématique 4 entreprises ont été sélectionnées.

Après visite des entreprises, des GES ont pu être effectués, le tableau ci-dessous illustre ces différents groupes.

Tableau 6: Identification des GES par entreprises

Entreprises	Secteurs	Identification soudeurs	Postes	Informations diverses
1	Carrosserie industrielle	1	Soudeur marbre principal	À la réception des résultats d'analyse, la présence non attendue de plomb identifiée a conduit à la réalisation d'une 2 ^e campagne de prélèvements sur les mêmes soudeurs, identifiés « soudeur 1 bis » et « soudeur 2 bis ». Le soudeur 2 bis, a soudé deux métaux différents au cours de sa journée. C'est pour cela que deux supports de prélèvements ont été utilisés.
		2	Soudeur marbre suite confection châssis	
		1 bis	Soudeur marbre principal	
		2 bis	Soudeur marbre suite confection châssis	
2	Travaux de forages, de sondages et de construction de puits	3	Opérateur de maintenance	L'opérateur de maintenance réalise des opérations de soudage sur certaines pièces.

Entreprises	Secteurs	Identification soudeurs	Postes	Informations diverses
3	Constructeur de machines agricoles et forestière	4	Pointage	14 postes de soudage regroupés en 5 GES avec 1 soudeur par GES.
		5	Châssis central	
		6	Rouleau en acier	
		7	Soudage divers	
		8	Soudage sur table aspirante	
4	Chaudronnerie	9	Fabrication de bac	3 des 4 soudeurs de l'entreprise ont fait l'objet d'une mesure.
		10	Fabrication de bac + découpe plasma manuelle	
		11	Montage	

2. Études de postes

Voici un tableau récapitulatif des informations provenant des différentes entreprises.

En annexe (annexes 8 à 17) se trouvent plus d'informations afin d'imager au mieux les postes de travail, les informations supplémentaires n'ont pas été incorporé dans le corps de mémoire afin de ne pas le surcharger.

Tableau 7: Informations concernant les conditions de travail des soudeurs

	Description des tâches	Durée (min)	Types de procédés	Matériel soudé	Matériel d'apport	EPC	EPI
Soudeur 1	Fabrication d'un châssis de camion. (Annexe 8)	422	MAG	Acier galvanisé	Acier	Torche aspirante	Cagoule ventilée avec filtre P3
Soudeur 2	Finaliser la confection des châssis de camion. (Annexe 9)	417	MAG	Acier galvanisé	Acier	Aucun	Masque de soudeur
Soudeur 1 bis	Les mêmes tâches que lors de la première mesure.	370	MAG	Acier galvanisé	Acier	Torche aspirante	Cagoule ventilée avec filtre P3
Soudeur 2 bis	Un soudage sur un acier galvanisé.	233	MAG	Acier galvanisé	Acier	Torche aspirante	Cagoule ventilée avec filtre P3
	Un rallongement de châssis sur un acier brut/noir.	150		Acier brut			
Soudeur 3	L'entretien de deux aléseurs. (Annexe 10)	222	MIG + découpe chalumeau	Acier	Acier	Caisson mobile avec bras aspirant	Masque de soudeur

	Description des tâches	Durée (min)	Types de procédés	Matériel soudé	Matériel d'apport	EPC	EPI
Soudeur 3	Entretien de deux aléseurs. (Annexe 10)	222	MIG + découpe chalumeau	Acier	Acier	Caisson mobile avec bras aspirant	Masque de soudeur
Soudeur 4	Assemblage et pointage de châssis latéral en acier. (Annexe 11)	324	MAG	Acier	Acier	Aucun	Cagoule ventilée avec filtre P3
Soudeur 5	Soudage du châssis central en acier. (Annexe 12)	320	MAG	Acier	Acier	Torche aspirante	Masque de soudeur
Soudeur 6	Soudage sur un rouleau en acier. (Annexe 13)	295	MAG	Acier	Acier	Torche aspirante	Masque de soudeur
Soudeur 7	Soudages, de pièces en acier→assemblage. (Annexe 14)	314	MAG	Acier	Acier	Aucun	Masque de soudeur
Soudeur 8	Soudage pièces de grande taille. (Annexe 15)	130	MAG	Acier	Acier	Table aspirante	Masque de soudeur
Soudeur 9	Fabrication d'un bac en acier, soudage + meulage. (Annexe 16)	480	MIG	Acier brut	Acier	Aucun	Masque de soudeur
Soudeur 10	Soudage, meulage + découpe plasma manuelle. (Annexe 16)	480	MIG + découper plasma	Acier brut	Acier	Aucun	Masque de soudeur
Soudeur 11	Montage d'un pochoir, meulage + soudage (Annexe 17)	480	MIG	Acier brut	Acier	Aucun	Masque de soudeur

3. Positionnement des capteurs

Le risque d'inhalation des polluants émis a été évalué à partir de prélèvements individuels. Les salariés ont été équipés de capteurs positionnés dans la zone respiratoire définie dans la norme EN 1540 comme l' « espace autour du nez et de la bouche dans lequel la respiration a lieu ». Les supports de prélèvements (cassette + filtre) sont reliés à des pompes fixées sur un harnais ignifugé. [50]

La cassette a été positionnée de telle sorte qu'elle soit située sous le casque de soudage lorsqu'il est porté.



Figure 6: Dispositif de captage de dos

Dans le cas des soudeurs fumeurs, le prélèvement a été interrompu (arrêt de la pompe et fermeture de la cassette) à chaque pause cigarette.

Le matériel a été posé en début de poste de travail et retiré en fin de poste.

4. Résultats des mesures des campagnes de prélèvement et interprétation

4.1 Entreprise 1

4.1.1 Soudeur 1 : Poste soudeur marbre principal

Tableau 8: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 1

Substances prélevées	Résultats (mg/m ³)	Durée Min.	CEP (mg/m ³)	VLEP (mg/m ³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	1.90	422	1,67	5	0,33
Fer	0.62		0,55	5	0,11
Manganèse	0.026		0,02	0.2	0,11
Poussières fraction alvéolaire	0.26	423	0,23	5 (VLEP actuelle)	0,046
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,255

Les résultats montrent un probable dépassement des VLEP des fumées de soudage au cours de l'année. Il existe un doute concernant le respect des VLEP du fer et du manganèse dont les concentrations mesurées sont comprises entre 0,1 et 0,3 x la VLEP.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation de l'ANSES de 2019.

4.1.2 Soudeur 2 : Poste soudeur marbre suite confection châssis

Tableau 9: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 2

Substances prélevées	Résultats (mg/m ³)	Durée Min.	CEP (mg/m ³)	VLEP (mg/m ³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	13.9	417	12,08	5	2,42
Fer	3.05		2,65	5	0,529
Manganèse	0.61		0,53	0.2	2,649

Cuivre	0.047		0,04	0.2	0,204
Plomb	0.012		0,01	5	0,002
Poussières fraction alvéolaire	8.34		7,25	5 (VLEP actuelle)	1,449
				0.9 (Recommandation ANSES)	8,050

Les concentrations de fumées de soudage, de manganèse et de la fraction alvéolaire des fumées de soudage dépassent de plusieurs fois leurs VLEP respectives.

Le résultat en cuivre est compris entre 0,1 et 0,3 x la VLEP rendant impossible, sur la base d'une seule mesure, la garantie d'un non-dépassement de la VLEP tout au long de l'année.

4.1.3 Soudeur 1 bis : Poste soudeur marbre principal

Tableau 10: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 1 bis

Substances prélevées	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	1.44	370	1,11	5	0,22
Fer	0.26		0,20	5	0,040
Manganèse	0.029		0,02	0.2	0,112
Zinc	0.005		0,00	5	0,0008
Poussières fraction alvéolaire	1.21		0,93	5 (VLEP actuelle)	0,1865
				0.9 (Recommandation ANSES)	1,036

Les résultats montrent un probable dépassement des VLEP des fumées de soudage au cours de l'année. Il existe un doute concernant le respect des VLEP du manganèse dont les concentrations mesurées sont comprises entre 0,1 et 0,3 x la VLEP.

Les concentrations de Fer et de Zinc semblent respecter leurs VLEP respectives.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.1.4 Soudeur 2 bis : Poste soudeur marbre suite confection châssis

Nous avons utilisé deux supports de prélèvements différents pour distinguer les émissions provenant de l'acier noir et de l'acier galvanisé. Les résultats des mesures réalisées sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Les mesures sur la période 1 ont été effectuées le matin de 7h54 h à 11h47. L'opérateur a soudé sur de l'acier galvanisé.

Les mesures sur la période 2 ont été effectuées l'après-midi de 15h30 à 16h. L'opérateur a soudé sur de l'acier noir (acier non revêtu).

Pour calculer l'exposition sur une journée complète de travail, nous avons utilisé la formule suivante : **Concentration journée complète = (C1xT1) + (C2xT2) / (T1+T2).**

T1 : temps de la période 1 = 233 minutes ; T2 : temps de la période 2 = 150 minutes.

C1 : concentration mesurée sur la période 1 ; C2 : concentration mesurée sur la période 2

Tableau 11: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 2 bis

Substances prélevées	Résultats (mg/m ³)	CEP (mg/m ³)	VLEP (mg/m ³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage (période 1)	8.99		5	
Fumées de soudage (période 2)	4.48			
Fumées de soudage (journée entière)	7.22	5,761		1,152
Zinc (période 1)	3.92		5	
Zinc (période 2)	0.18			
Zinc (journée entière)	2.45	1,955		0,391
Fer (période 1)	1.96		5	
Fer (période 1)	2.30			
Fer (journée entière)	2.09	1,668		0,334
Manganèse (période 1)	0.20		0.2	
Manganèse (période 2)	0.11			

Manganèse (journée entière)	0.165	0,132		0,658
Cuivre (période 1)	0.023		0.2	
Cuivre (période 2)	0.12			
Cuivre (journée entière)	0.06	0,0479		0,239
Titane (période 1)	0		10	
Titane (période 2)	0.007			
Titane (journée entière)	0.003	0,002		0,0002
Plomb (période 1)	0.006		0.1	
Plomb (période 2)	0			
Plomb (journée entière)	0.0036	0,003		0,0287
Poussières fraction alvéolaires (période 1)	7.92			
Poussières fraction alvéolaires (période 2)	0.34			
Poussières fraction alvéolaire	4.95	3,949	5 <i>(VLEP actuelle)</i>	0,790
			0.9 <i>(Recommandation ANSES)</i>	4,389

Les fumées de soudage ont été quantifiées sur l'opérateur avec une concentration supérieure à la VLEP-8h dans les conditions de travail observées le 22 juin 2021.

Les résultats ont montré la présence de plomb sur la mesure réalisée sur acier galvanisé (période 1) en concentration inférieure à 10% de la VLEP-8h qui n'est plus présent dans les polluants émis par le soudage d'acier noir (période 2). Le plomb pourrait être présent dans le métal de base en tant qu'impureté ou avoir été ajouté dans l'alliage initial pour la galvanisation à chaud afin d'améliorer l'usinabilité dans la production industrielle (autorisation jusqu'à 0,35 % de plomb en poids).

On retrouve du titane sur acier noir (période 2) en concentration inférieure à 10% 28 de la VLEP-8h qui n'est pas présent dans l'acier galvanisé (période 1). Le titane pourrait provenir de la composition de l'acier noir ou du primaire d'accroche blanc appliqué sur le métal.

Toutefois, le dioxyde de titane n'apparaît pas dans la composition du produit indiquée dans la FDS datant de 2017.

Les concentrations en poussières fraction alvéolaire correspondent à 99% de la VLEP 8h. On remarque que le niveau d'exposition est nettement plus important pour le soudage d'acier galvanisé (période 1) que pour le soudage d'acier noir (période 2).

4.2 Entreprise 2

4.2.1 Soudeur 3 : Poste opérateur de maintenance

Tableau 12: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 3

Substances prélevées	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	2.64	222	1,22	5	0,2442
Fer	1.34		0,62	5	0,1240
Manganèse	0.086		0,04	0.2	0,1989
Zinc	0.030		0,01	5	0,0028
Tungstène	0.017		0,01	-	Non calculable
Cuivre	0.013		0,01	0.2	0,0301
Poussières fraction alvéolaire	0.44		0,20	5 (VLEP actuelle)	0,0407
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,2261

Les résultats montrent un probable dépassement des VLEP des fumées de soudage au cours de l'année. Il existe un doute concernant le respect des VLEP du Fer et du manganèse dont les concentrations mesurées sont comprises entre 0,1 et 0,3 x la VLEP.

Les concentrations de zinc et de cuivre semblent respecter leurs VLEP respectives.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.3 Entreprise 3

4.3.1 soudeur 4 : Poste pointage

Tableau 13: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 4

Substances prélevées	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	2.17	324	1,46	5	0,2930
Fer	1.34		0,90	5	0,1809
Manganèse	0.052		0,04	0.2	0,1755
Zinc	0.006		0,00	5	0,0008
Poussières fraction alvéolaire	0.60		0,41	5 (VLEP actuelle)	0,0810
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,4500

Les résultats montrent un probable dépassement des VLEP des fumées de soudage au cours de l'année. Il existe un doute concernant le respect des VLEP du Fer et du manganèse dont les concentrations mesurées sont comprises entre 0,1 et 0,3 x la VLEP.

La VLEP du Zinc est vraisemblablement respectée.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.3.2 Soudeur 5 : Poste châssis central

Tableau 14: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 5

Substances prélevées	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	1.91	320	1,27	5	0,2547
Fer	0.99		0,66	5	0,1320
Manganèse	0.072		0,05	0.2	0,2400
Zinc	0.008		0,01	5	0,0011
Poussières fraction alvéolaire	0.33		0,22	5 (VLEP actuelle)	0,0440
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,2444

Les résultats montrent un probable dépassement des VLEP des fumées de soudage au cours de l'année. Il existe un doute concernant le respect des VLEP du fer et du manganèse dont les concentrations mesurées sont comprises entre 0,1 et 0,3 x la VLEP.

La concentration de zinc semble respecter la VLEP -8h.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation de l'ANSES de 2019.

4.3.3 Soudeur 6 : Poste rouleau en acier

Tableau 15: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 6

Substances prélevées	Résultats (mg/m ³)	Durée Min.	CEP (mg/m ³)	VLEP (mg/m ³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	3.67	295	2,26	5	0,4511
Fer	2.22		1,36	5	0,2729
Manganèse	0.17		0,10	0.2	0,5224
Cuivre	0.006		0,00	0.2	0,0184

Zinc	0.009		0,01	5	0,0011
Poussières fraction alvéolaire	0.34		0,21	5 (VLEP actuelle)	0,0418
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,2322

Les concentrations de fumées de soudage et de manganèse dépassent de 0.3x leurs VLEP respectives. Les concentrations en cuivre et en zinc semblent respecter leurs VLEP respectives. Le résultat en fer est compris entre 0,1 et 0,3 x la VLEP rendant impossible, sur la base d'une seule mesure, la garantie d'un non-dépassement de la VLEP tout au long de l'année. Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.3.4 Soudeur 7 : Poste soudage divers

Tableau 16: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 7

Substances prélevées	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	1.85	314	1,21	5	0,2420
Fer	1.12		0,73	5	0,1465
Manganèse	0.051		0,03	0.2	0,1668
Zinc	0.008		0,01	5	0,0010
Poussières fraction alvéolaire	0.37		0,24	5 (VLEP actuelle)	0,0484
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,2689

Les résultats montrent un probable dépassement des VLEP des fumées de soudage au cours de l'année. Il existe un doute concernant le respect des VLEP du fer et du manganèse dont les concentrations mesurées sont comprises entre 0,1 et 0,3 x la VLEP. Il y a une nécessité d'affiner le diagnostic. La concentration de zinc semble respecter la VLEP -8h. Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.3.5 Soudeur 8 : Poste soudage sur table aspirante

Tableau 17: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 8

Substances prélevées	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	0.57	130	0,15	5	0,0309
Fer	0.24		0,07	5	0,0130
Manganèse	0.014		0,00	0.2	0,0190
Poussières fraction alvéolaire	0.87		0,24	5 (VLEP actuelle)	0,0471
				0.9 (Recommandation ANSES)	0,2618

Les concentrations en fumées de soudage, Fer et Manganèse respectent probablement leurs VLEP respectives.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un probable dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.4 Entreprise 4

4.4.1 soudeur 9 : Poste fabrication de bac

Tableau 18: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 9

Substance prélevée	Résultats (mg/m ³)	Durée Min.	CEP (mg/m ³)	VLEP (mg/m ³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	4.43	480	4.43	5	0.886
Fer	2.52		2.52	5	0.504
Manganèse	0.15		0.15	0.2	0.750
Aluminium	0.028		0.028	5	0.006
Cuivre	0.012		0.012	0.2	0.060
Zinc	0.009		0.009	5	0.002

Poussières fraction alvéolaire	0.26		0.26	5 (VLEP actuelle)	0.052
				0.9 (Recommandation ANSES)	0.289

La mesure de fumées de soudage, de fer et de manganèse réalisée en individuel sur l'opérateur indique des concentrations supérieures à 30% des VLEP respectives. Des mesures de prévention sont à mettre en place. La mesure des poussières fraction alvéolaire réalisée en individuel sur l'opérateur indique des concentrations comprises entre 10 et 30% des VLEP respectives. Il est impossible de conclure quant au statut de dépassement de la VLEP. Des mesures complémentaires sont requises afin d'affiner le diagnostic.

4.4.2 Soudeur 10 : Poste fabrication de bac + découpe plasma manuelle

Tableau 19: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 10

Substance prélevée	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	4.40	480	4.40	5	0.880
Fer	2.49		2.49	5	0.498
Manganèse	0.11		0.11	0.2	0.550
Aluminium	0.030		0.030	5	0.006
Cuivre	0.009		0.009	0.2	0.045
Zinc	0.009		0.009	5	0.002
Poussières fraction alvéolaire	1.11		1.11	5 (VLEP actuelle)	0.222
				0.9 (Recommandation ANSES)	1.233

La mesure de fumées de soudage, de fer et de manganèse réalisée en individuel sur l'opérateur indique des concentrations supérieures à 30% des VLEP respectives. Des mesures de prévention sont à mettre en place. Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un large dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

4.4.3 Soudeur 11 : Poste montage

Tableau 20: Résultats des mesures atmosphériques individuelles pour le Soudeur 11

Substance prélevée	Résultats (mg/m³)	Durée Min.	CEP (mg/m³)	VLEP (mg/m³)	R (CEP-8h/VLEP)
Fumées de soudage	3.15	480	3.15	5	0.630
Fer	1.65		1.65	5	0.330
Manganèse	0.15		0.15	0.2	0.750
Aluminium	0.021		0.021	5	0.004
Cuivre	0.006		0.006	0.2	0.030
Zinc	0.005		0.005	5	0.001
Poussières fraction alvéolaire	1.07		1.07	5 (VLEP actuelle)	0.214
				0.9 (Recommandation ANSES)	1.189

La mesure de fumées de soudage, de fer et de manganèse réalisée en individuel sur l'opérateur indique des concentrations supérieures à 30% des VLEP respectives. Des mesures de prévention sont à mettre en place.

Pour l'aluminium, le cuivre et le zinc, les résultats sont inférieurs à 10% de leurs VLEP respectives, leurs VLEP sont vraisemblablement respectées.

Concernant la fraction alvéolaire des particules de FS, la concentration mesurée montre un large dépassement de la VLEP si on se base sur la recommandation ANSES de 2019.

5. Analyse statistique

Les résultats des mesures sont regroupés dans le tableau à l'annexe n°18. La figure 7 reprend les résultats des mesures des éléments retrouvés majoritairement sur l'ensemble des points de mesure. Ainsi, les fumées de soudage (FS), le Fer (Fe), le Manganèse (Mn) et la fraction alvéolaire des fumées de soudage (Alv.) sont représentés.

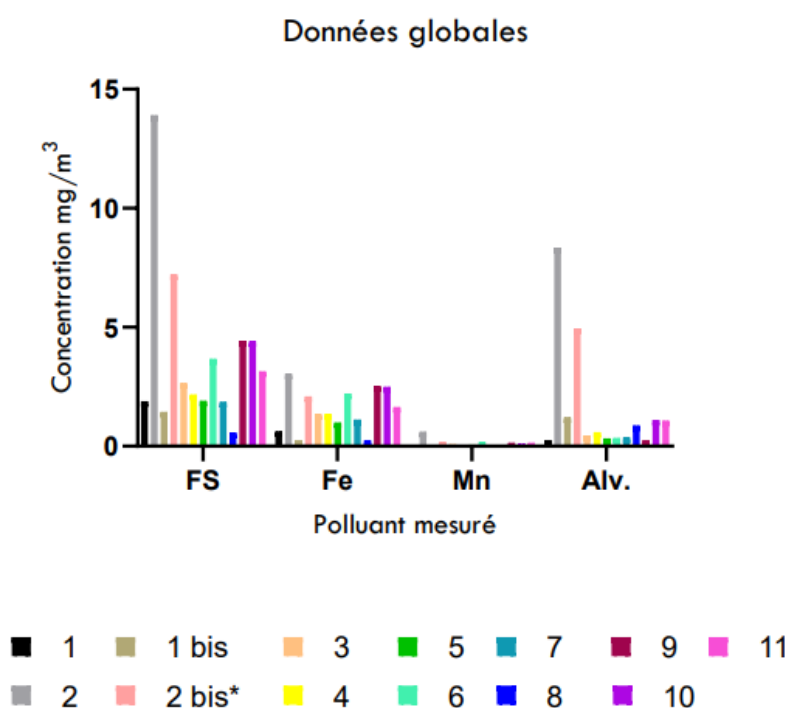


Figure 7 : Diagramme en bâtons représentant les concentrations des principaux polluants rencontrés pour chaque soudeur

On observe une grande variabilité des résultats des mesures de fumées de soudage en fonction des soudeurs et des entreprises dans lesquelles les mesures ont été réalisées, de $13.90 \text{ mg}/\text{m}^3$ pour le soudeur 2 à $0.57 \text{ mg}/\text{m}^3$ pour le soudeur 8.

La nature et la concentration des métaux identifiés peuvent varier en fonction du point de mesure.

Les concentrations de fer sont fortement corrélées à celles des fumées de soudage, car il en est un composant majoritaire. Le manganèse est également fortement représenté.

Un test de corrélation de PEARSON a été effectué afin d'étudier l'association entre la fraction alvéolaire des fumées de soudage et la fraction inhalable. Le coefficient obtenu est de 0.9254, qui confirme la corrélation entre ces deux fractions.

À noter que la comparaison des résultats entre les différents postes de travail concernés par les mesures atmosphériques n'est pas pertinente. En effet, la quantité de fumées de

soudage produite dépend de nombreux paramètres tels que : le procédé de soudage, la composition du fil ou de l'électrode, la position de soudage (à plat, en angle), la présence de revêtements ou de contaminant sur le métal de base, etc...

Les graphiques ci-dessus permettent d'avoir une vue d'ensemble et d'indiquer si oui ou non les résultats de mesure de fumées de soudage dépassent la VLEP dans les conditions de travail observées le jour des mesures. Ils permettent également d'observer sur l'ensemble des résultats si le seuil est ou non supérieur au seuil d'action fixé à 10% de la VLEP.

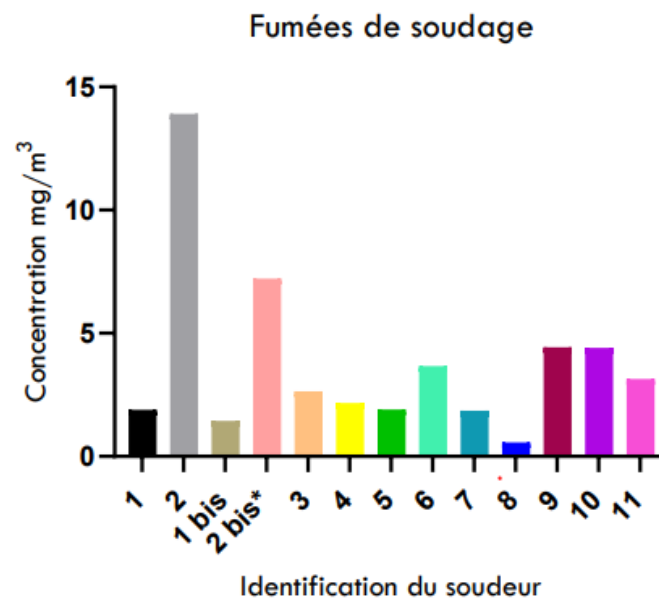


Figure 8 : Diagramme en bâtons représentant les concentrations des fumées de soudage mesurées pour chaque soudeur

Ce diagramme en bâtons permet de comparer les concentrations obtenues en fumées de soudage pour l'ensemble de la population étudiée (11 soudeurs).

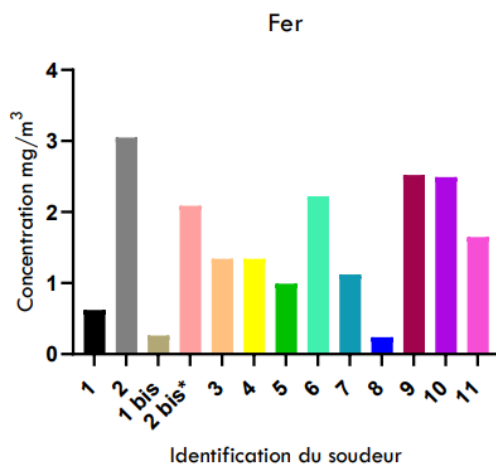


Figure 9: Diagramme en bâtons représentant les concentrations de fer mesurées pour chaque soudeur

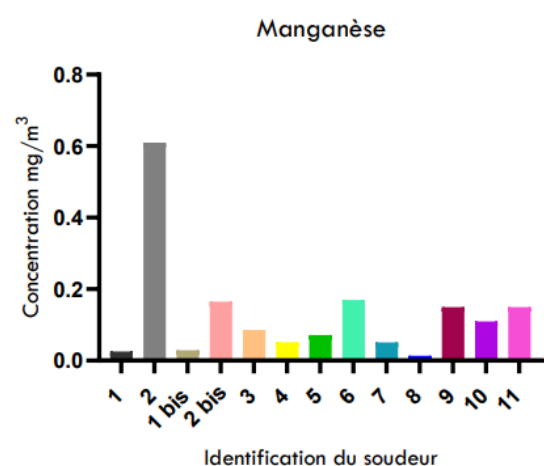


Figure 10: Diagramme en bâtons représentant les concentrations de manganèse mesurées pour chaque soudeur

Ces deux diagrammes permettent de comparer les concentrations obtenues chez les soudeurs en fer pour la figure 9 et en manganèse pour la figure 10.

Particules fraction alvéolaire

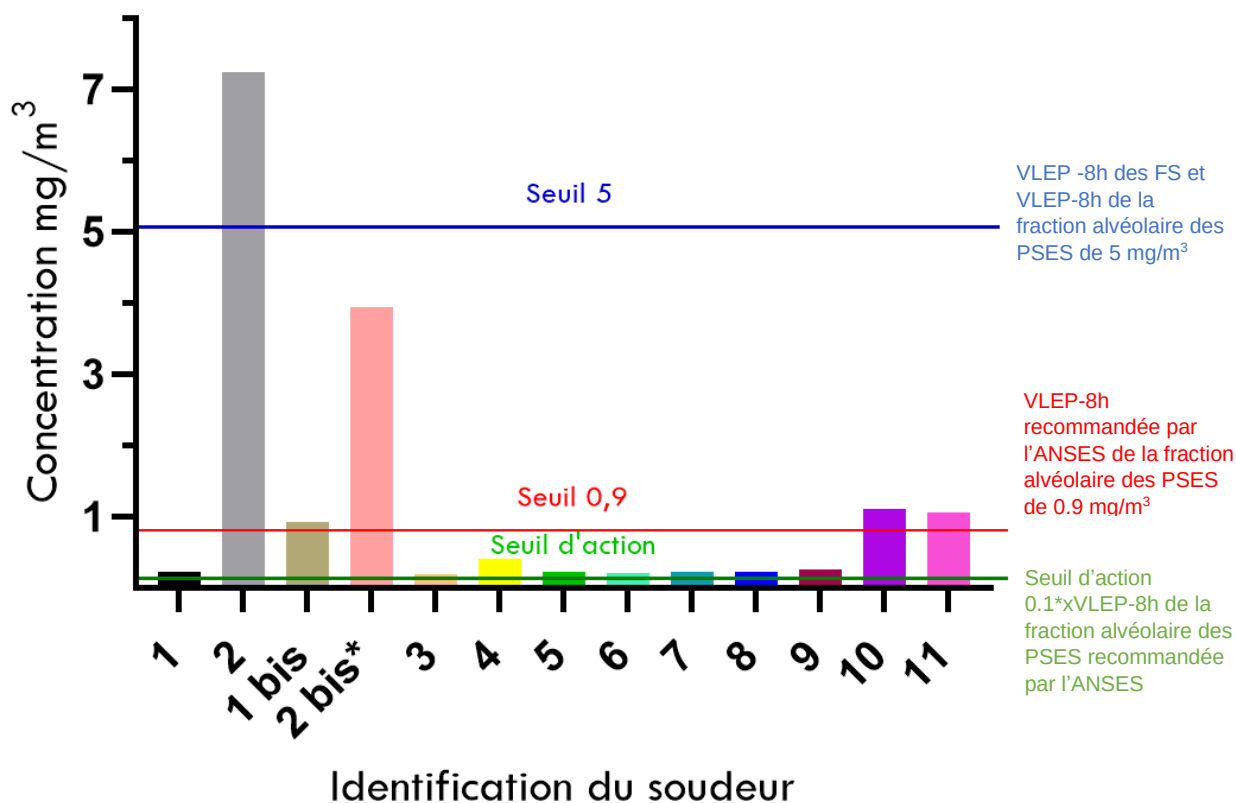


Figure 11 : Diagramme en bâtons représentant les concentrations de particules fraction alvéolaire mesurées pour chaque soudeur

L'ensemble des mesures des fractions alvéolaires des fumées de soudage sont regroupées dans ce diagramme. La ligne bleue représente la VLEP-8h des FS ainsi que la VLEP-8h de la fraction alvéolaire des PSES qui sont toutes deux à 5 mg/m³. La ligne rouge représente la VLEP-8h recommandée par l'ANSES de la fraction alvéolaire des PSES qui est de 0.9 mg/m³. Enfin, la ligne verte représente le seuil d'action, 0.1xVLEP-8h de la fraction alvéolaire des PSES recommandée par l'ANSES, soit 0.09 mg/m³. Les concentrations mesurées sont très variables en fonction du salarié sur lequel la mesure a été réalisée, en revanche on constate que pour tous les soudeurs les valeurs sont supérieures au seuil d'action.

IV. Discussion

L'objectif de cette étude est de caractériser l'exposition professionnelle des soudeurs à la fraction alvéolaire des fumées de soudage. Quatre entreprises spécialisées dans le soudage ou ayant des salariés exerçant des activités de soudage ont été sélectionnées. Pour chaque entreprise, nous avons réalisé une pré-visite afin d'identifier l'activité, de construire les GES et d'établir une stratégie de prélèvement pertinente. Une fois les prélèvements effectués, les supports de prélèvements ont été déposés, en respectant les consignes liées au transport, au laboratoire d'analyse de la CARSAT Hauts de France pour déterminer les concentrations en polluants recueillis sur chaque support de prélèvement. Les résultats des mesures ont été étudiés et comparés à des valeurs limites d'exposition selon les règles d'interprétation précises.

L'ANSES définit des valeurs seuils à ne pas dépasser afin de limiter les dangers encourus par les salariés. Ces valeurs peuvent faire l'objet de réévaluation au regard de nouvelles données scientifiques, comme c'est le cas des PSES. Les PSES sont définies comme des poussières « qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou sur tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet qu'un effet de surcharge » (circulaire DGT du 9 mai 1985).[11]

À la suite de la publication d'un avis relatif à la pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et des risques associés chez les travailleurs, la direction générale du travail (DGT) a demandé à l'ANSES de réévaluer les valeurs des PSES.

Une expertise a donc été lancée et a permis de démontrer que la toxicité générale des PSES résulte de la rétention prolongée dans le poumon des particules, susceptibles au-dessus d'un certain seuil, d'entraîner une diminution de la clairance pulmonaire (alvéolaire et bronchique) par surcharge des mécanismes d'épuration conduisant à des conséquences locales telles que l'inflammation.

L'ANSES a alors recommandé, sur la base d'une analyse critique des rapports et expertises scientifiques internationaux déjà existants, la fixation de valeurs limites d'exposition professionnelle sur huit heures (VLEP-8h) de 4 mg.m^{-3} pour la fraction inhalable et de $0,9 \text{ mg.m}^{-3}$ pour la fraction alvéolaire pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES).[12] Les valeurs proposées sont très inférieures aux seuils actuels et sont d'avantage protecteurs compte tenu des effets démontrés.

Les fumées de soudage sont composées de particules dont la taille et la proportion varient selon les procédés de soudage, une part importante des particules émises lors du soudage présente un diamètre inférieur à $1 \mu\text{m}$, voire $0,1 \mu\text{m}$ (figure 12). Du fait de leur très petite

taille, ces poussières sont susceptibles d'atteindre la région alvéolaire de l'appareil respiratoire et d'y exercer leur toxicité.

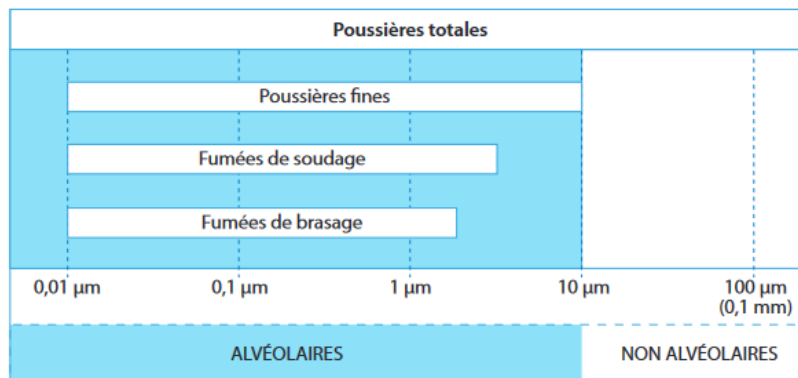


Figure 12: Représentation du diamètre de certaines poussières (poussières fines, FS, fumées de brassage) en μm [9]

Pour appréhender les risques des particules ultrafines, il est nécessaire de considérer les niveaux de dépôt des particules dans les voies respiratoires. Sur la figure 13, on constate que les particules de FS sont susceptibles de se déposer au niveau des trois principales régions de l'arbre respiratoires.

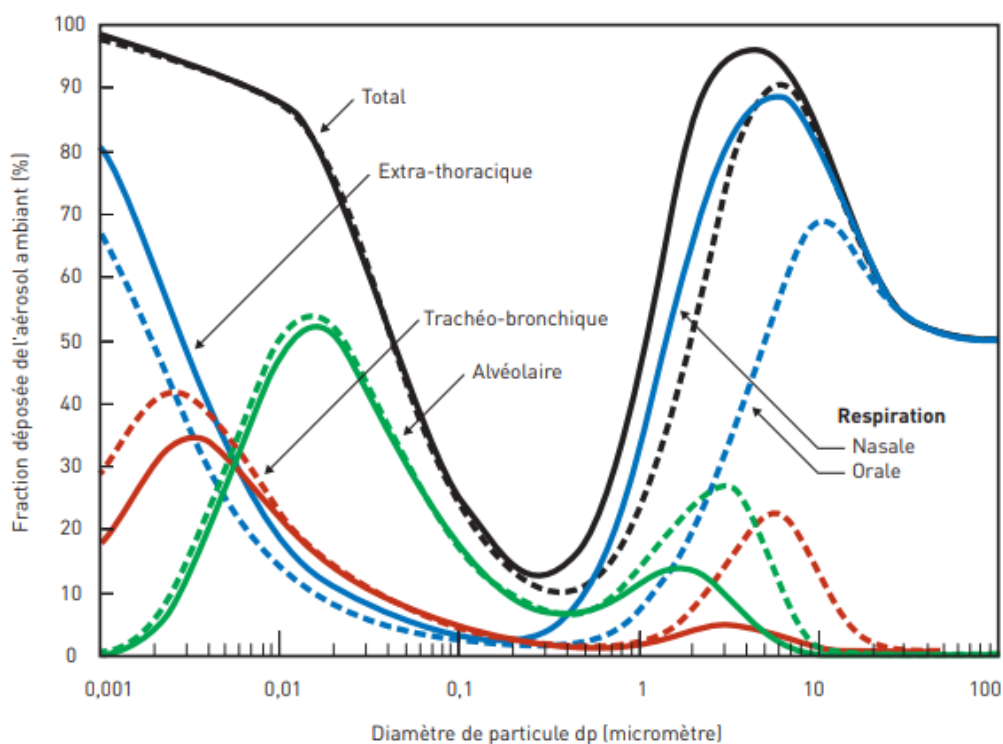


Figure 13: Courbes prédictives du dépôt des particules dans l'arbre respiratoire humain [53]

La figure 13 montre le dépôt total et régional en fonction du diamètre des particules. Les courbes correspondent à un sujet respirant majoritairement par la bouche ou le nez sur une activité dite légère. Le dépôt est le plus faible autour de 300 nm environ, car les particules sont trop petites pour que l'impaction et la sédimentation aient un effet et trop grosses, pour que le mécanisme de diffusion soit important. On constate également que le mode de dépôt

des particules ultrafines (PUF) est plus uniforme dans l'ensemble des voies respiratoires que pour les particules de taille microniques. Ainsi, un dépôt plus diffus va multiplier les sites d'interaction et créer une plus grande capacité des PUF à être absorbées et à transporter des substances qui pourraient être toxiques.[53]

De nombreuses études épidémiologiques et toxicologiques montrent que les particules ultrafines induisent des effets spécifiques sur la santé.

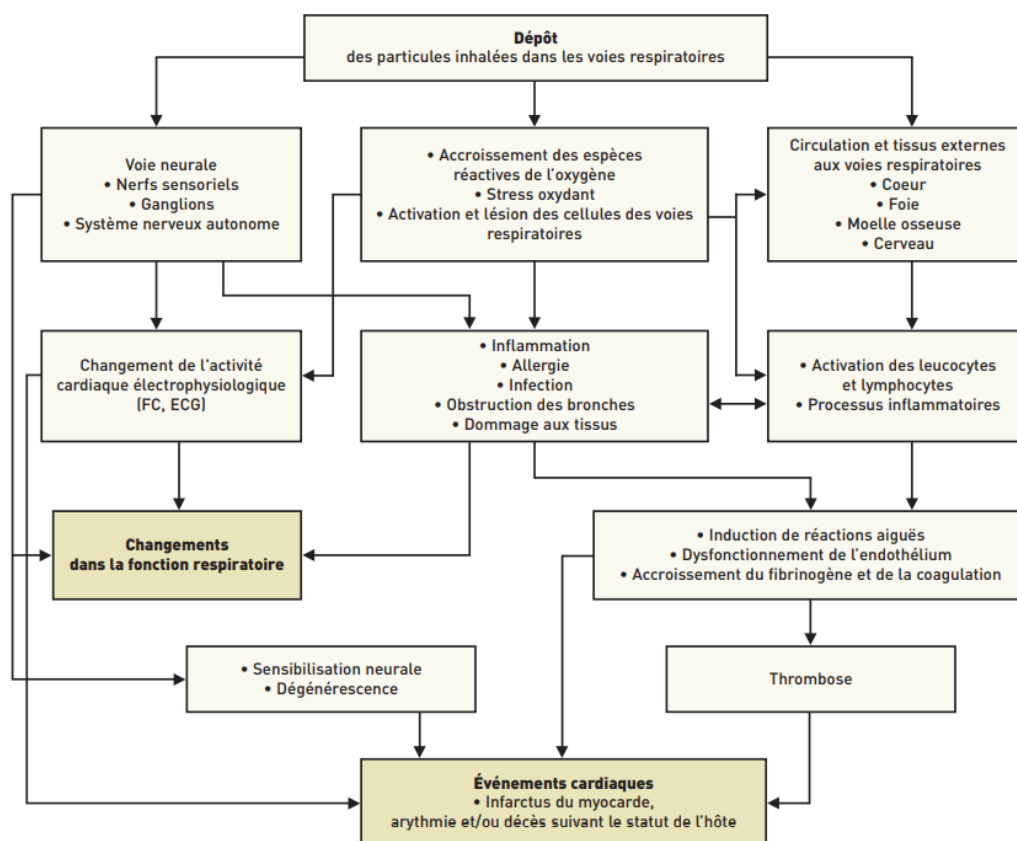


Figure 14: Hypothèses concernant les effets sur la santé des particules fines et ultrafines de l'aérosol ambiant d'après Kreyling et coll. [53].

La figure 14, reprend les travaux de Kreyling cité par Witschger. Ce logigramme permet d'illustrer les hypothèses concernant les effets sur la santé des particules fines et ultra fines. C'est en connaissance de ces données qu'il paraît indispensable de prendre en compte la fraction alvéolaire des FS et non pas uniquement la fraction inhalable dans la caractérisation des expositions des soudeurs.

À ce jour, la réglementation ne propose pas de valeurs seuils pour la fraction alvéolaire des fumées de soudages. Chaque mesure faite en service de santé au travail est donc comparée à la VLEP sur huit heures pour la totalité des particules composant les fumées de soudage qui est de 5 mg/m³.

Au cours de notre étude, nous avons caractérisé l'exposition de soudeurs aux particules de fumées de soudage et aux métaux qui les composent.

Tableau 21 : Ratio obtenus pour les fumées de soudage et les poussières fraction alvéolaire chez les 11 soudeurs

	VLEP (mg/m ³)	Ratio (CEP-8h/VLEP)												
		S 1	S 2	S 1 bis	S 2 bis*	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	S 11
Fumées de soudage	5	0.34	2.41	0.22	1.15	0.24	0.29	0.25	0.45	0.24	0.03	0.886	0.880	0.630
Poussières fraction alvéolaire	5 (VLEP actuelle)	0.046	1.45	0.19	0.79	0.04	0.08	0.04	0.04	0.048	0.047	0.052	0.222	0.214
	0.9 (Recommandation ANSES)	0.25	8.05	1.04	4.4	0.23	0.45	0.24	0.23	0.27	0.26	0.289	1.233	1.189

La comparaison des résultats mesurés à la VLEP des FS et des PSES (actuelle et proposée par l'ANSES) sont résumés dans le tableau ci-dessus.

Les niveaux d'expositions des salariés aux FS peuvent être séparés en 3 ensembles :

- 5 mesures comprises entre 0,1 et 0,3 x VLEP (en orange.)
- 5 mesures > 0,3 x VLEP (en rouge).
- 2 mesures > VLEP (en noir).

D'après les observations des activités des salariés réalisées au cours des prélèvements, on remarque que les niveaux d'expositions sont corrélés au temps de soudage effectif du salarié, au type de soudage (cordons de soudure ou pointage) et à la présence d'EPC sur le poste de travail.

Les deux mesures supérieures à la VLEP des FS sont associées à une activité très soutenue sans équipement de protection collectifs et dans un atelier dépourvu de ventilation générale.

Les mesures réalisées sur le soudeur 2 bis montrent l'impact du métal soudé sur le niveau d'exposition. Pour un même temps de soudage avec le même procédé, les concentrations mesurées sont presque multipliées par 6. La nature du métal soudé a également un impact sur la composition des émissions de FS. L'analyse de la composition des particules émises par le soudage d'acier noir est différente de celle du soudage d'acier galvanisé pour lequel la présence de plomb a été détectée.

L'expérience du soudeur est également un déterminant de l'exposition et dans le cas présent, le salarié 2 était un apprenti. Des éléments tels que le positionnement de la torche ou la position du soudeur peut générer une exposition du salarié plus importante. Une étude

dirigée par Graczyk en 2016, montre que le savoir-faire des soudeurs influe sur l'exposition aux FS. [52]

Les résultats des mesures de la fraction alvéolaire des PSES sont inquiétants surtout si on les compare à la VLEP proposée par l'ANSES car :

- 3 sont supérieures à la VLEP proposée. Les 2 mesures réalisées sur le soudeur 2 doivent être ôtées de l'étude du fait de l'incertitude de la qualité du relevé. En effet, nous avons remarqué que ce salarié déplaçait le capteur placé au niveau de ses voies respiratoires car il le gênait. Le corps du capteur s'est retrouvé dans la position horizontale et l'orifice d'entrée du cyclone orienté vers l'arrière ce qui est contraire aux recommandations de l'INRS (fiche METROPOL « Interprétation statistique des résultats de mesure »). La sélection de la fraction alvéolaire des particules récoltées n'est pas assurée.
- 7 sont comprises entre 0,1 et 0,3 x VLEP.
- 1 est > 0,3 x VLEP.

Nous avons réalisé un test statistique qui démontre l'existence d'une corrélation entre les concentrations de FS et de PSES fraction alvéolaire. Or la mesure de fraction alvéolaire des PSES n'est pas réalisée en routine pour caractériser l'exposition des salariés aux FS c'est la fraction inhalable qui est admise pour une comparaison à la VLEP. Il est permis de supposer qu'à chaque fois qu'un dépassement FS a été mesuré, la fraction alvéolaire des FS présente était au moins comprise entre 0,1 et 0,3 x VLEP PSES proposée par l'ANSES. Les effets critiques des PSES retenus sont basés sur les conséquences engendrées par une surcharge pulmonaire. Or, la fraction alvéolaire des FS est un mélange de métaux qui en plus de pouvoir provoquer un effet de surcharge ont une toxicité qui leur est propre et pour certains métaux présentent des propriétés cancérigènes.

Il semble donc que la VLEP actuelle des FS de 5 mg/m³ ne soit pas suffisamment protectrice pour la santé des salariés et que la méthode de mesure ne soit pas adaptée à la nature même des FS. L'application de la VLEP proposée pour la fraction alvéolaire des PSES semble plus appropriée et pertinente pour la protection des salariés contre les expositions aux FS.

Néanmoins, il faut garder à l'esprit que les VLEP n'intègrent pas la pénibilité de certains travaux physiques intenses pouvant entraîner une augmentation de la quantité d'air inhalé et donc accroître la pénétration des polluants dans l'organisme. De même, les VLEP ne tiennent compte que de l'exposition par voie respiratoire, mais pas par les voies cutanée ou digestive. Elles ne prennent pas non plus compte de l'effet potentiellement cumulatif ou

synergique des substances entre elles ou sur d'autres organes secondairement touchés (substances ototoxiques...).

C'est pour cela que nous avons complété les prélèvements atmosphériques de l'entreprise 1 avec des prélèvements de surfaces. Nous avons constaté un transfert de pollution dans le réfectoire. Le tableau 22 présente les concentrations en μg de métaux retrouvés sur la table du réfectoire et sur la poignée du réfrigérateur qui suggère une forte possibilité de contamination par voie cutanée et surtout digestive.

Tableau 22 : Résultats d'analyse des prélèvements surfaciques en μg sur la lingette.

Opérateurs	Table réfectoire	Poignée réfrigérateur
Fer	138	91
Zinc	39	-
Aluminium	35	24
Baryum	5	7

Notre étude présente des points critiques qu'il est temps d'évoquer.

D'abord, l'analyse des FS est réalisée selon la méthode développée par l'INRS METROPOL M-274 « aérosols en fraction inhalable ». Les FS sont un mélange de gaz et de particules émises au cours des activités de soudage. La technique d'analyse est basée sur la gravimétrie. C'est-à-dire que seule la fraction particulaire est prise en compte et que c'est une masse qui est mesurée. Cela implique que si des particules provenant d'autres sources que le soudage sont émises pendant le prélèvement, elles seront captées dans la cassette. Il se peut donc qu'une partie des particules mesurées sur les filtres proviennent du meulage, du ponçage, du nettoyage etc.... Il est malheureusement impossible de distinguer la part issue des FS et celle émanant d'autres sources. Or, par principe de précaution, quand bien même on pourrait supposer que les concentrations en FS soient inférieures à ce qui a été mesuré, ce sera la valeur maximum qui sera retenue et prise en compte. Les particules émises lors des travaux de soudage et de coupage ayant un diamètre aérodynamique $<1\mu\text{m}$, la fraction alvéolaire joue un rôle central du point de vue des effets sur la santé. Les données relatives aux poussières inhalables conduisent plutôt à une surestimation qu'à une sous-estimation de l'exposition.

Deuxièmement, les nanoparticules ne sont pas retenues sur les filtres quartz de ce fait, on occulte également cette fraction dans notre évaluation. Le diamètre limite de rétention des filtres en quartz est compris entre 1,2 et 10 μm . Les particules de taille inférieure passent au travers du filtre.

Ensuite, la courbe de dépôt « en U » observé dans la figure 13, révèle une situation hypothétique particulière dont est important de discuter. D'après l'approche actuelle employée en santé-travail, une même exposition conduit théoriquement à un même effet.

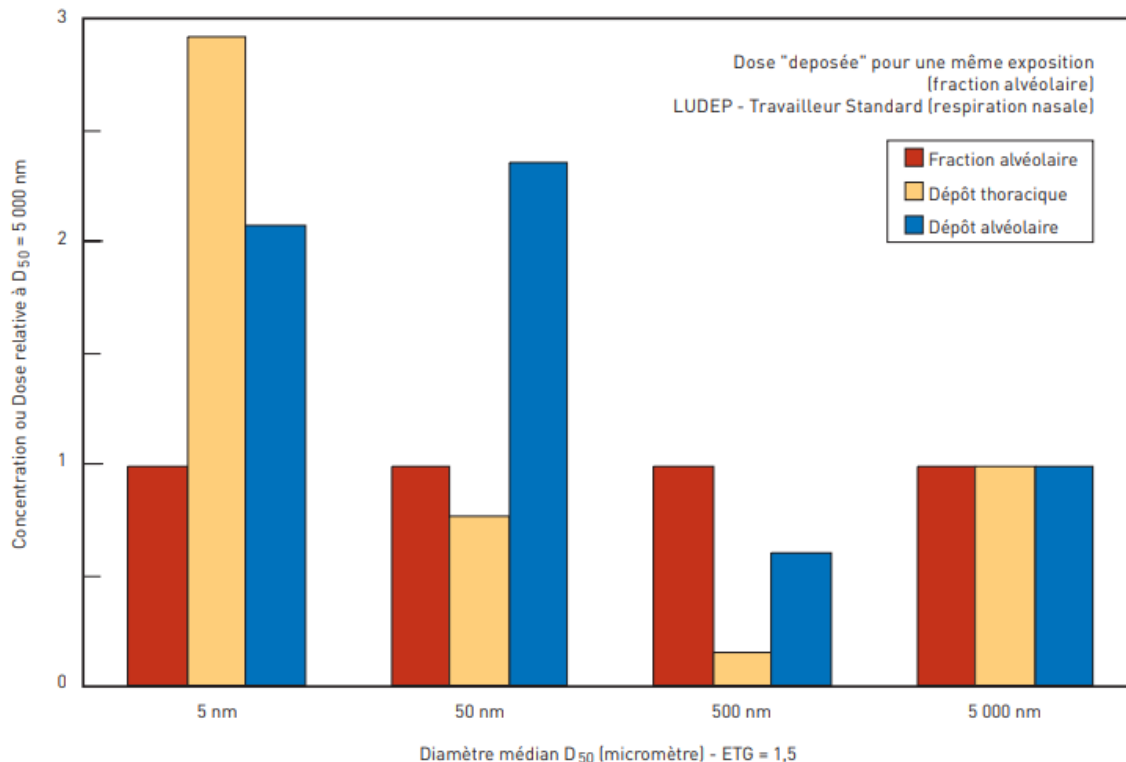


Figure 15: Concentration et prédiction du dépôt régional pour une même exposition en termes de fraction alvéolaire.[53]

La figure 15 montre que pour une même concentration en fraction alvéolaire (en rouge sur la figure), la quantité déposée (en orange et bleu) augmente lorsque le diamètre des particules diminue (plus grande concentration pour un diamètre médian de 5 nm).

Enfin, on ne prend en compte que la phase particulaire des FS, or il y a des gaz qui sont émis et qui peuvent s'avérer irritants et donc favoriser voire amplifier les mécanismes d'inflammations.

Étant donné les résultats obtenus, il convient d'étudier les possibilités permettant de diminuer l'exposition de l'ensemble des opérateurs. La réglementation impose de privilégier les équipements de protection collectifs aux mesures individuelles.

Pour l'ensemble des entreprises étudiées les préconisations suivantes ont été proposées :

- Équipement des postes à souder ne disposant pas de système d'aspiration à la source de torches en rappelant à l'entreprise que l'installation d'un tel système implique la mise en place de maintenances régulières et de contrôles au moins une fois par an.

- Installation d'un système de ventilation générale assurant un apport d'air neuf et propre.
- Mise en place systématique de rideaux ou écrans opaques pour protéger les salariés à proximité contre les rayonnements.
- Nettoyage régulier des postes au fur et à mesure de l'activité constitue une bonne pratique permettant d'éviter l'accumulation de poussières et leur ré-envol.
- Mise en place d'une procédure de nettoyage reprenant l'ensemble des bonnes pratiques définies en concertation avec les opérateurs afin de les impliquer dans la démarche et de garantir leur adhésion.
- Proscrire les opérations de balayage à sec et l'utilisation de la soufflette, car elles entraînent la remise en suspension des poussières et constituent des phases particulièrement exposantes pour les opérateurs.
- Privilégier les techniques de nettoyage par aspiration, car elles permettent le nettoyage du sol et des équipements avec utilisation d'embouts et accessoires adaptés.
- Recommandation du port de la cagoule ventilée ou d'un masque ventilé avec filtre P3 pour tous les soudeurs n'en possédant pas encore quelle que soit la durée du soudage afin de réduire l'exposition au niveau le plus bas possible.
- La formation des salariés à l'utilisation adéquate aux appareils de protection individuels mis en place (port, mise en fonctionnement, entretien et stockage). Un soin particulier devra être accordé à l'entretien et au stockage des équipements. Les casques, masques et cagoules doivent être régulièrement nettoyés (intérieur et extérieur) et entreposés en dehors des ateliers si possible, dans des locaux spécifiques non pollués.
- Prévoir un espace dédié pour la restauration.
- Rappeler les règles générales d'hygiène. Il est important de se nettoyer les mains avant chaque repas et chaque pause.
- Sensibilisation des opérateurs aux risques liés au soudage, à l'utilisation des équipements de protection collective et au port des équipements de protection individuelle est indispensable. En plus de l'exposition aux fumées, le risque lié aux rayonnements optiques est également à prendre en compte.

Conclusion

Les fumées de soudage représentent un risque professionnel important. Selon la matière soudée ainsi que la technique utilisée, la composition des fumées diffère, devenant plus ou moins néfaste pour l'organisme humain.

Durant cette étude, l'objectif était de caractériser l'exposition des soudeurs à la fraction alvéolaire des FS dans diverses entreprises.

Ceci a pu être réalisé grâce à l'élaboration d'une méthodologie de repérage des expositions professionnelles aux FS. Elle s'est appuyée sur les données bibliographiques existantes et a été construite en fonction des moyens matériels et financiers à notre disposition. La méthodologie s'est articulée en trois parties : une étude de situation reposant sur l'examen de l'activité de l'entreprise et sur l'analyse des documents disponibles, une analyse de l'activité de l'entreprise pour identifier les opérations potentiellement exposantes, suivie d'une campagne de mesures. Cette dernière comprenait le suivi de la masse des fractions inhalable et alvéolaire des fumées de soudage.

L'analyse de l'activité a mis en exergue une exposition jugée importante aux fumées de soudage. Nous avons également constaté qu'une attention particulière devait être consacrée à la fraction alvéolaire des FS. Ce qui n'est pas le cas actuellement puisque la méthode de prélèvement ne concerne que la fraction inhalable. La campagne de mesures nous a permis d'affirmer que les résultats sont préoccupants au regard des nouvelles valeurs préconisées par l'ANSES.

Actuellement, il n'existe pas de VLEP spécifique pour la fraction alvéolaire des fumées de soudage. Les prélèvements effectués ont donc été comparés à la VLEP -8h de la fraction alvéolaire des PSES qui a récemment fait l'objet d'une réévaluation. Selon les données toxicologiques et épidémiologiques actuelles, les FS sont susceptibles de causer plus de dommages que les PSES. La comparaison au VLEP des PSES serait donc une sous-estimation des dangers.

Les résultats de notre étude confortent notre postulat de départ, il est indispensable que les autorités compétentes mettent en place une VLEP-8h pour la fraction alvéolaire des fumées de soudage, qui nous le rappelons, concernerait 598 000 salariés (enquête SUMER). [6]

Bibliographie

- [1] Statistiques de sinistralité 2019 tous CTN et par CTN - Accidents du travail, Accidents de trajet, Maladies professionnelles. 2019;62.
- [2] INRS - Risques chimiques. Réglementation de la prévention des risques chimiques - Risques [Internet]. [cité 18 avril 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/chimiques/reglementation.html>
- [3] Légifrance- Article R4412-3 - Code du travail [Internet]. [cité 19 avril 2021]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000030680417/
- [4] IARC. Chromium, Nickel and Welding [Internet]. [cité 22 mai 2021]. Disponible sur: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Chromium-Nickel-And-Welding-1990> (page 507)
- [5] IARC. Welding, Molybdenum Trioxide, and Indium Tin Oxide [Internet]. [cité 22 mai 2021]. Disponible sur: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Welding-Molybdenum-Trioxide-And-Indium-Tin-Oxide-2018> (page 265)
- [6] Travail Emploi Gouvernement 2013-054-2.pdf [Internet]. [cité 18 avril 2021]. Disponible sur: <https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/2013-054-2.pdf> (page 7)
- [7] INRS - Risques chimiques. Réglementation de la prévention des risques chimiques - Risques [Internet]. [cité 08 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/chimiques/reglementation.html>
- [8] INRS - Mesure des expositions aux agents chimiques et biologiques. Réglementation - Risques - [Internet]. [cité 08 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/mesure-expositions-agents-chimiques-biologiques/reglementation.html>
- [9] INRS - Les fumées de soudage et des techniques connexes - Brochure [Internet]. [cité 16 avril 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206132>(page 4)
- [10] INRS - Métaux et métalloïdes M-120 - MétroPol [Internet]. [cité 16 avril 2021]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_120
- [11] SSTIE Circulaire du 09/05/85 relative au commentaire technique des décrets nos 84-1093 et 84-1094 du 7/12/1984 concernant l'aération et l'assainissement des lieux de travail | [Internet]. [cité 18 juin 2021]. Disponible sur: https://sstie.ineris.fr/consultation_document/21593
- [12] Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail - AVIS et RAPPORT de l'Anses relatif à la proposition de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel - Evaluation des effets sur la santé sur le lieu de travail pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES) | [Internet]. [cité 23 mars 2021]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de->

[lances-relatif-%C3%A0-la-proposition-de-valeurs-limites-d'exposition-%C3%A0-des](#)(page 10)

[13] Mezrag B. Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT. :204. (page 14)

[14] Forsapre - FUMÉES DE SOUDAGE | [Internet]. [cité 22 mai 2021]. Disponible sur: https://www.forsapre.fr/fiches_fan/fumees-de-soudage

[15] INRS - Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées - Brochure [Internet]. [cité 10 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/media.html?reflNRS=ED%2083>(pages 1 et 2)

[16] Procédé TIG et avantages - Guide du soudeur [Internet]. EasyWeld. [cité 22 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.easyweldfrance.com/procede-tig-guide-du-soudeur/>

[17] Cours sur la soudure TIG (Soudage Tungsten Inert Gas) [Internet]. Rocd@cier. 2017 [cité 22 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.rocdacier.com/cours-soudure-tig/>

[18] Procédé MIG-MAG - Guide du Soudeur [Internet]. EasyWeld. [cité 24 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.easyweldfrance.com/procede-mig-mag-guide-du-soudeur/>

[19] Mezrag B. Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT. :204. (pages 19 à 28)

[20] INRS - Webinaire – Fumées de soudage : risques pour la santé et prévention -Agenda [Internet]. [cité 22 avril 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/webinaire-fumees-soudage.html>

[21] Sobaszek A, Boulenguez C, Frimat P, Robin H, Haguenoer JM, Edme JL. Acute respiratory effects of exposure to stainless steel and mild steel welding fumes. J Occup Environ Med. sept 2000;42(9):923-31.

[22] INRS- Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. [Internet]. [cité 15 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.cancer-environnement.fr/Portals/0/Documents%20PDF/Valeurs%20limites%20d'expositions%20professionnelles.pdf> (page 5)

[23] Carolin Godin, guide-multiprevention-soudage-coupage.pdf [Internet]. [cité 12 juin 2021]. Disponible sur: <https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2018/11/guide-multiprevention-soudage-coupage.pdf> (page 26)

[24] Association pulmonaire du Québec. Fibrose pulmonaire [Internet]. [cité 10 mai 2021]. Disponible sur: <https://poumonquebec.ca/maladies/fibrose-pulmonaire/>

[25] Les effets sur la santé respiratoire de la fumée de soudage [Internet]. [cité 10 mai 2021]. Disponible sur: <https://uttam.quebec/chronique-MT/fumee-de-soudage.php>

- [26] La fièvre des soudeurs résulte de l'inhalation de particules ultra-fines qui créent une inflammation pulmonaire. | AtouSante [Internet]. [cité 13 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.atousante.com/risques-professionnels/nanoparticules-particules-ultra-fines/nanomateriaux-exposition-prevention/fievre-soudeurs-inhalation-particules-ultra-fines/>
- [27] Rahul M, Sivapirakasam SP, Vishnu BR, Balasubramanian KR, Mohan S. Health issue owing to exposure with welding fumes and their control strategies at the source—A review. Materials Today: Proceedings [Internet]. 18 févr 2020 [cité 15 mai 2021]; Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320306210>
- [28] Wardhana null, Datau EA. Metal fume fever among galvanized welders. Acta Med Indones. juill 2014;46(3):256-62.
- [29] Inserm - Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) · Inserm, La science pour la santé [Internet]. [cité 15 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/dossier/bronchopneumopathie-chronique-obstructive-bpco/>
- [30] Eisner MD, Anthonisen N, Coultas D, Kuenzli N, Perez-Padilla R, Postma D, et al. An official American Thoracic Society public policy statement: Novel risk factors and the global burden of chronic obstructive pulmonary disease. Am J Respir Crit Care Med. 1 sept 2010;182(5):693-718. (page 707)
- [31] Oxford Academic - Welding fume exposure and chronic obstructive pulmonary disease in welders | Occupational Medicine | [Internet]. [cité 16 mai 2021]. Disponible sur: <https://academic-oup-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/occmed/article/65/1/72/1431717>
- [32] Kakoe H. RELATIONSHIP BETWEEN CONCENTRATION OF WELDING FUMES AND CHANGES IN WELDERS' LUNG FUNCTIONS. :4.
- [33] Minov J, Karadzinska-Bislimovska J, Tutkun E, Risteska-Kuc S, Stoleski S, Mijakoski D. CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE IN NEVER-SMOKING WELDING WORKERS. :6.
- [34] Stücker I, Matrat M. Cancer broncho-pulmonaire et fumées de soudage (résultats de l'étude Icare soudure). Les cahiers de la Recherche Santé, Environnement, Travail. 2014;(5):13.
- [35] Vallières E, Pintos J, Lavoué J, Parent M-É, Rachet B, Siemiatycki J. Exposure to welding fumes increases lung cancer risk among light smokers but not among heavy smokers: evidence from two case–control studies in Montreal. Cancer Med. août 2012;1(1):47-58.
- [36] Sørensen AR, Thulstrup AM, Hansen J, Ramlau-Hansen CH, Meersohn A, Skytthe A, et al. Risk of lung cancer according to mild steel and stainless steel welding. Scand J Work Environ Health. oct 2007;33(5):379-86.

- [37] Honaryar MK, Lunn RM, Luce D, Ahrens W, 't Mannetje A, Hansen J, et al. Welding fumes and lung cancer: a meta-analysis of case-control and cohort studies. *Occup Environ Med.* juin 2019;76(6):422-31.
- [38] Lewis RJ, éditeur. *Hawley's Condensed Chemical Dictionary* [Internet]. 1^{re} éd. Wiley; 2007 [cité 20 mai 2021]. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470114735>
- [39] Guha N, Loomis D, Guyton KZ, Grosse Y, El Ghissassi F, Bouvard V, et al. Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. *The Lancet Oncology.* mai 2017;18(5):581-2.
- [40] Emmett EA, Horstman SW. Factors Influencing the Output of Ultraviolet Radiation During Welding. *Journal of Occupational and Environmental Medicine.* janv 1976;18(1):41-4.
- [41] INRS - Soudage de métaux : un risque cancérigène avéré - Actualité [Internet]. [cité 22 avril 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/actualites/soudage-metaux-risque-cancerogene.html>
- [42] CNESST - Fiche complète pour Gaz et fumées de soudage et de coupage [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=13896
- [43] INRS - Fumées de soudage. Fumées de soudage - Risques [Internet]. [cité 15 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/fumees-soudage/ce-qu-il-faut-retenir.html> (pages 7 à 9)
- [44] INRS - Les valeurs limites d'exposition professionnelle - Brochure [Internet]. [cité 06 avril 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206443> (page 5)
- [45] Ministère du Travail, de l'Emploi et de l'Insertion. 2021. Valeurs limites d'exposition professionnelle (risques chimiques) [Internet]. [cité 06 avril 2021]. Disponible sur: <https://travail-emploi.gouv.fr/sante-au-travail/prevention-des-risques-pour-la-sante-au-travail/mesures-et-moyens-de-prevention/article/valeurs-limites-d-exposition-professionnelle-risques-chimiques>
- [46] Légifrance - Article R4624-4-1 - Code du travail [Internet]. [cité 22 juin 2021]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000029235360
- [47] INRS - Aérosols en fraction inhalable M-274 - MétroPol [Internet]. [cité 16 avril 2021]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_274
- [48] INRS - Métaux et métalloïdes M-122 - MétroPol [Internet]. [cité 16 avril 2021]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_122

- [49] INRS - Aérosols en fraction alvéolaire M-278 - MétroPol [Internet]. [cité 16 avril 2021]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_278
- [50] INRS Guide méthodologique MétroPol - Publications et outils - [Internet]. [cité 26 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/guide-methodologique-metropol.html>
- [51] Légifrance - Arrêté du 15 décembre 2009 relatif aux contrôles techniques des valeurs limites d'exposition professionnelle sur les lieux de travail et aux conditions d'accréditation des organismes chargés des contrôles [Internet]. [cité 12 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000021487566/>
- [52] Graczyk H, Lewinski N, Zhao J, Concha-Lozano N, Riediker M. Characterization of Tungsten Inert Gas (TIG) Welding Fume Generated by Apprentice Welders. The Annals of Occupational Hygiene. 1 mars 2016;60(2):205-19.
- [53] Witschger O, Fabriès JF. Particules ultra-fines et santé au travail. 1 - Caractérisation des effets potentiels sur la santé. INRS. 1 janv 2005;199:21-35. (pages 28-29-31)

Table des matières

Introduction	1
I. État de l'art	5
1. Généralités sur les fumées de soudage	5
1.1 Définition des FS	5
1.2 Les différents procédés de soudage	5
1.3 Caractérisation des fumées de soudage	7
2. Effets sur la santé	8
2.1 Devenir des particules chez l'homme	8
2.2 Exposition aiguë	11
2.3 Exposition chronique	12
3. Le contexte réglementaire	15
3.1 La prévention du risque chimique.....	15
3.2 Les valeurs limites d'exposition professionnelle	16
3.3 VLEP des fumées de soudage	17
II. Matériels et méthodes	19
1. Étude de situation	19
1.1 Sélection des entreprises	19
1.2 Identifier le type de procédé mis en œuvre et les substances potentiellement présentes.....	19
2. Campagne de mesurage et analyse des résultats.....	21
2.1 Métrologie atmosphérique	21
2.2 Étude de postes	26
3. Analyse et interprétation des résultats.....	27
3.1 Rappel des VLEP fumées de soudages.....	27
3.2 Démarche retenue pour l'interprétation des résultats.....	27
III. Résultats.....	29
1. Étude de situation	29
2. Études de postes	31
3. Positionnement des capteurs	33
4. Résultats des mesures des campagnes de prélèvement et interprétation.....	34
4.1 Entreprise 1	34
4.2 Entreprise 2	38
4.3 Entreprise 3	39
4.4 Entreprise 4	42
5. Analyse statistique.....	45

IV. Discussion	48
Conclusion	56
Bibliographie	58
Liste des figures.....	66
Liste des tableaux.....	67
Annexes.....	68

Liste des figures

Figure 1 : Fusion de l'électrode (soudage MMA) [15]	6
Figure 2 :Schéma de transfert de métal avec soudage TIG [16].....	6
Figure 3 : Schéma de transfert de métal avec soudage MIG/MAG [18].....	6
Figure 4 : Les différentes régions du système respiratoire [9]	9
Figure 5:Représentation des fractions conventionnelles : ① : alvéolaire ; ① + ② : thoracique ; ① + ② + ③ : inhalable [22]	9
Figure 6: Dispositif de captage de dos.....	33
Figure 7 : Diagramme en bâtons représentant les concentrations des principaux polluants rencontrés pour chaque soudeur	45
Figure 8 : Diagramme en bâtons représentant les concentrations des fumées de soudage mesurées pour chaque soudeur	46
Figure 9: Diagramme en bâtons représentant les concentrations de fer mesurées pour chaque soudeur	46
Figure 10: Diagramme en bâtons représentant les concentrations de manganèse mesurées pour chaque soudeur	46
Figure 11 : Diagramme en bâtons représentant les concentrations de particules fraction alvéolaire mesurées pour chaque soudeur	47
Figure 12: Représentation du diamètre de certaines poussières (poussières fines, FS, fumées de brassage) en μm [9]	49
Figure 13: Courbes prédictives du dépôt des particules dans l'arbre respiratoire humain [53].....	49
Figure 14: Hypothèses concernant les effets sur la santé des particules fines et ultrafines de l'aérosol ambiant d'après Kreyling et coll. [53]......	50
Figure 15: Concentration et prédiction du dépôt régional pour une même exposition en termes de fraction alvéolaire.[53].....	54

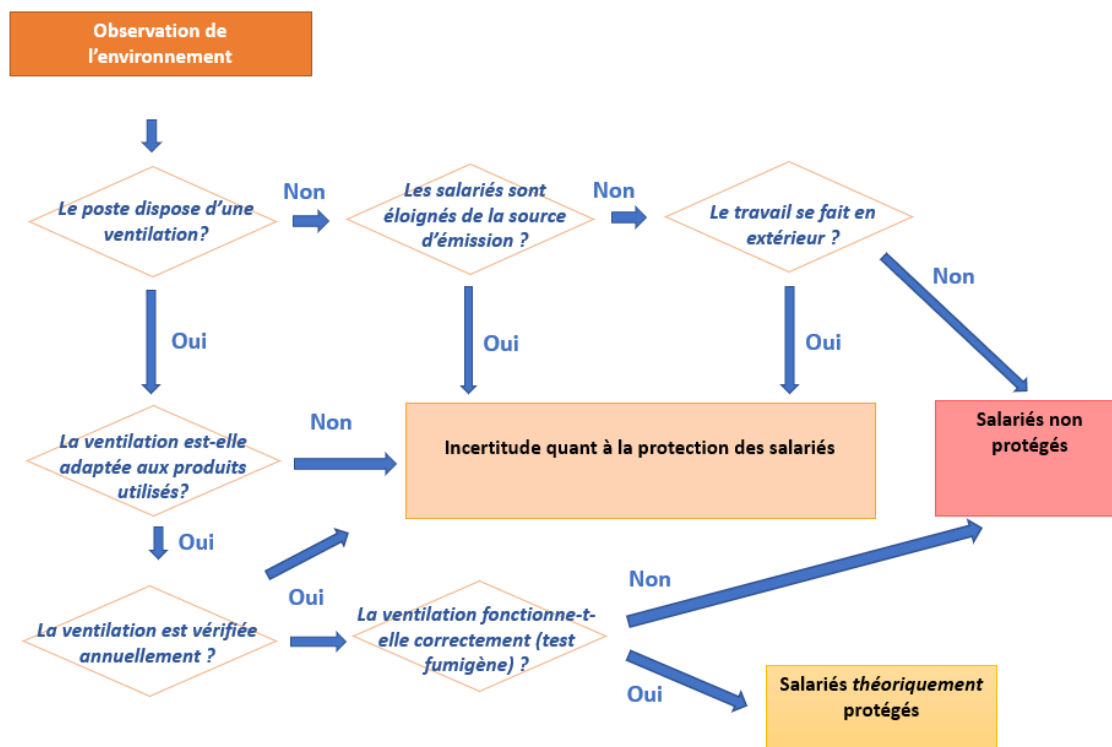
Liste des tableaux

Tableau 1: Description des procédés de soudage les plus courants	6
Tableau 2: La classification des principaux agents cancérogènes rencontrés lors des activités de soudage et des techniques connexes [43]	15
Tableau 3: Les VLEP des principaux polluants rencontrés lors de travaux de soudage [43]	17
Tableau 4: Valeurs limites d'exposition professionnel des FS et des PSES	27
Tableau 5: Démarche d'interprétation des résultats de métrologie (Document interne à AST)	28
Tableau 6: Répartition des soudeurs par entreprise	29
Tableau 7: Informations concernant les conditions de travail des soudeurs	31
Tableau 8: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 1	34
Tableau 9: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 2	34
Tableau 10: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 1 bis ...	35
Tableau 11: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 2 bis ..	36
Tableau 12: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 3	38
Tableau 13: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 4	39
Tableau 14: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 5	40
Tableau 15: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 6	40
Tableau 16: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 7	41
Tableau 17: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 8	42
Tableau 18: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 9	42
Tableau 19: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 10	43
Tableau 20: Résultats des mesures atmosphériques individuels pour le Soudeur 11	44
Tableau 21 : Ratio obtenus pour les fumées de soudage et les poussières fraction alvéolaire chez les 11 soudeurs	51
Tableau 22 : Résultats d'analyse des prélèvements surfaciques en µg sur la lingette.	53

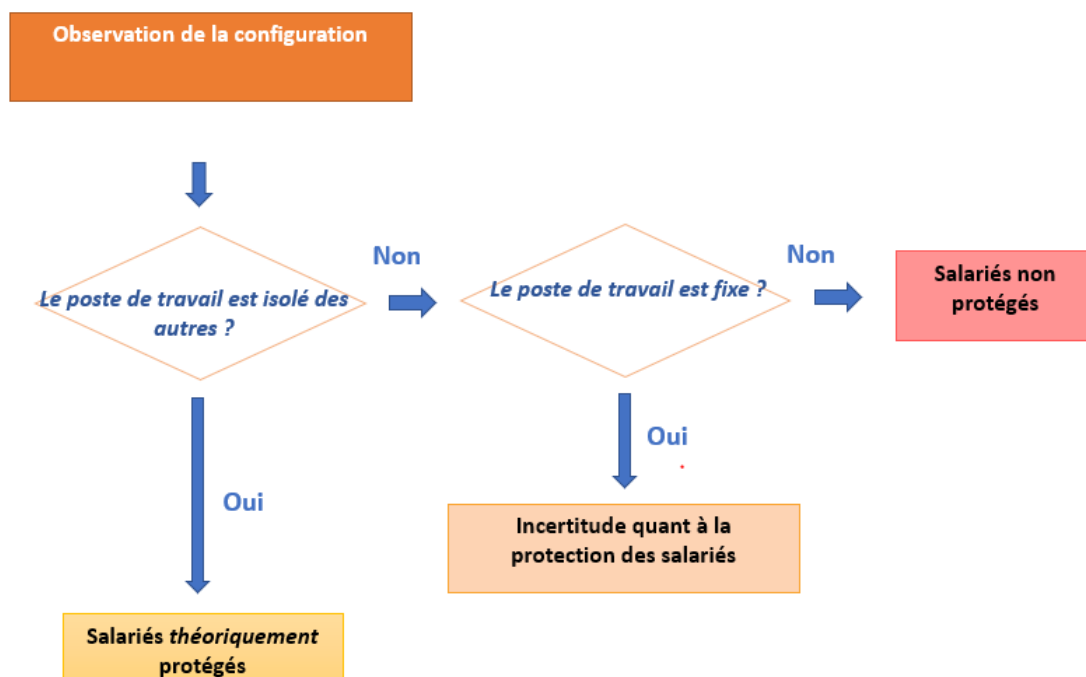
Annexes

Annexe 1: Logigramme de l'analyse du poste de travail (document interne AST).....	69
Annexe 2: Logigramme de l'analyse de la configuration du poste (document interne à AST).....	69
Annexe 3: Logigramme de l'analyse du procédé de travail (document interne à AST).....	70
Annexe 4: Logigramme de l'analyse des scénarii d'exposition (document interne à AST)	70
Annexe 5: Logigramme de recueil des FDS (document interne à AST).....	71
Annexe 6: Matériels utilisés pour effectuer les prélèvements	72
Annexe 7 : Stratégie de prélèvement et choix d'un laboratoire	73
Annexe 8 : Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 1	75
Annexe 9: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 2	76
Annexe 10: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 3	77
Annexe 11: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 4	78
Annexe 12: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 5	79
Annexe 13: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 6	80
Annexe 14 : Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 7	81
Annexe 15: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 8	82
Annexe 16: Descriptif de l'activité réalisée par les soudeurs 9 et 10	83
Annexe 17: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 11	84
Annexe 18 : Prélèvements individuels des principaux polluants retrouvés chez les soudeurs en mg/m ³	85

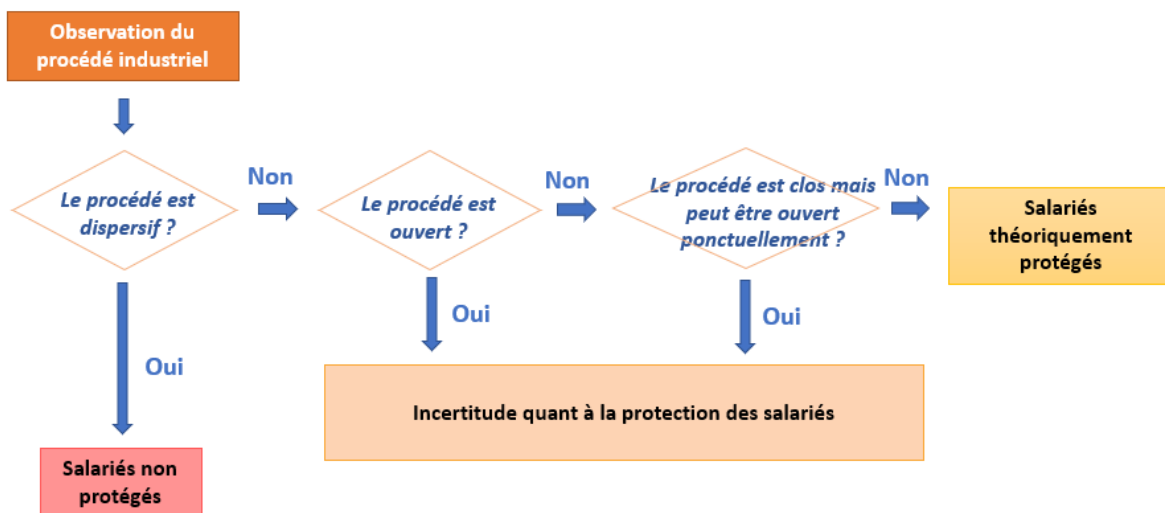
Annexe 1: Logigramme de l'analyse du poste de travail (document interne AST)



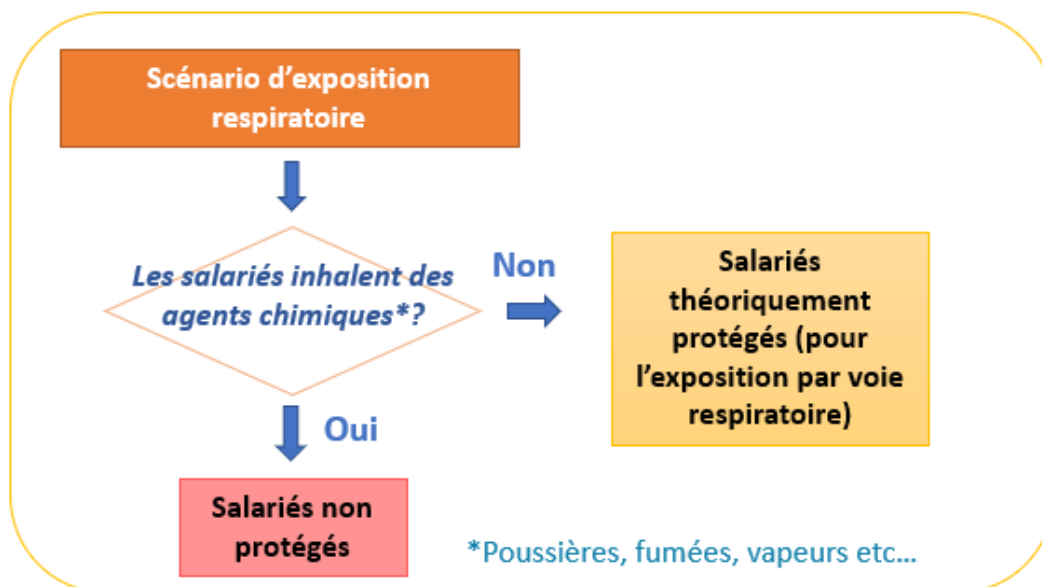
Annexe 2: Logigramme de l'analyse de la configuration du poste (document interne à AST)



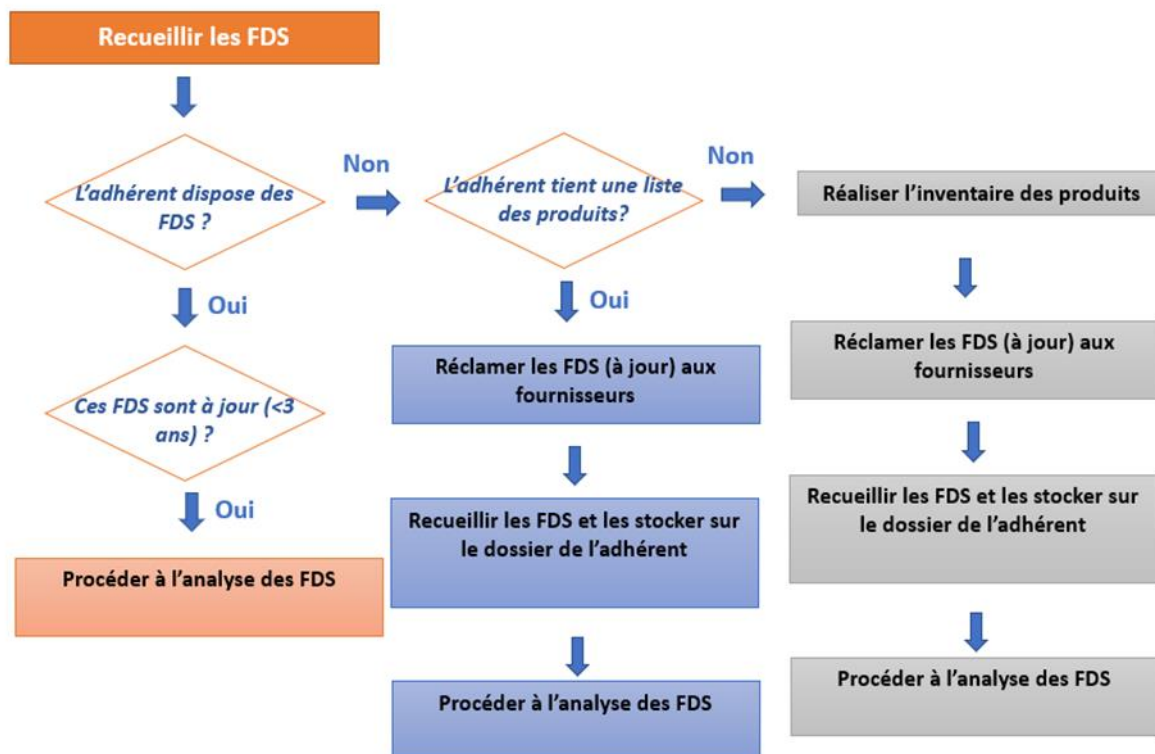
Annexe 3: Logigramme de l'analyse du procédé de travail (document interne à AST)



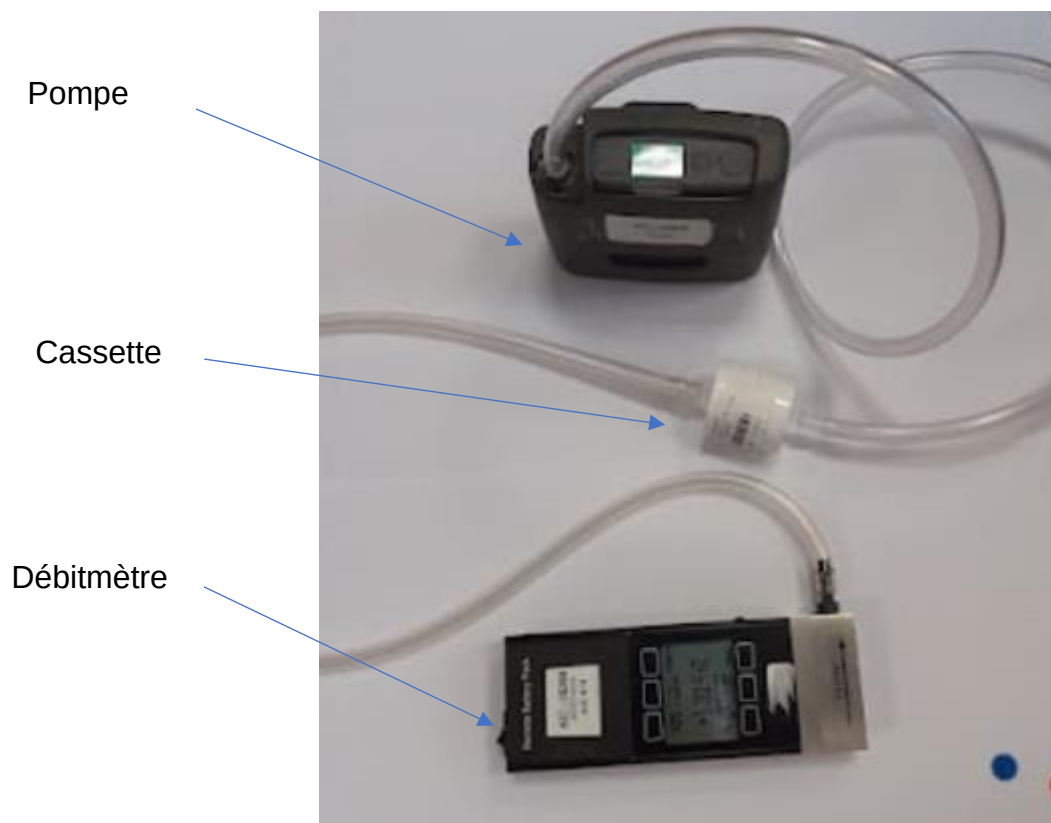
Annexe 4: Logigramme de l'analyse des scénarii d'exposition (document interne à AST)



Annexe 5: Logigramme de recueil des FDS (document interne à AST)



Annexe 6: Matériels utilisés pour effectuer les prélèvements



Annexe 7 : Stratégie de prélèvement et choix d'un laboratoire



ACTION SANTE TRAVAIL
Siège : 174 Route de Béthune 62160 AIX-NOULETTE
Tél. : 03-21-18-42-00 Fax : 03-21-18-42-37
SIRET 783 936 891 00192 – APE : 8621 Z

STRATEGIE DE PRELEVEMENT ET CHOIX D'UN LABORATOIRE

Hénin-Beaumont, le 19 Janvier 2021

Monsieur,
Suite à notre rencontre le 18 janvier 2021, nous vous avons proposé un accompagnement afin d'évaluer l'exposition professionnelle des opérateurs poste marbre aux fumées de soudage.

STRATEGIE DE PRELEVEMENT

Dans le cadre de cette intervention, ACTION SANTE TRAVAIL propose la stratégie de prélèvement suivante:

POSTE DE SOUDAGE MARBRE PRINCIPAL:

- 1 mesure individuelle de fumées de soudage, fer et manganèse fraction inhalable sur supports adaptés par pompage actif pendant une journée de travail type de l'opérateur.

POSTE DE SOUDAGE MARBRE SUITE CONFECTION CHASSIS:

- 1 mesure individuelle de fumées de soudage, fer et manganèse fraction inhalable sur supports adaptés par pompage actif pendant une journée de travail type de l'opérateur.

En parallèle de ces mesures, des **prélèvements surfaciques** vont être effectués à visée pédagogique :

- Mains d'un des opérateurs avant et après lavage des mains.
- Cagoule ventilée avant et après nettoyage.
- Table du réfectoire.
- Poignée du micro-onde/ réfrigérateur.

Pour plus d'informations concernant le coût de cette intervention et afin de nous signifier le laboratoire d'analyses de votre choix, vous pouvez vous reporter en page 2.

En vous remerciant par avance,

Sarah RUCK
Toxicologue Industrielle

Sanaa EL KAASAOUI
**Contrat de professionnalisation en
Toxicologie Industrielle**



ACTION SANTE TRAVAIL

Siège : 174 Route de Béthune 62160 AIX-NOULETTE

Tél. : 03-21-18-42-00 Fax : 03-21-18-42-37

SIRET 783 936 891 00192 – APE : 8621 Z

CHOIX DU LABORATOIRE

Concernant le coût des supports et des analyses des prélèvements atmosphériques, vous pouvez confier l'ensemble de cette prestation au laboratoire de chimie toxicologie de la CARSAT (LICT) qui effectuera les analyses gratuitement (les supports de prélèvements nécessaires seront pris en charge par votre service de santé, l'AST). La collaboration entre l'AST et le LICT nécessite le respect des dispositions suivantes :

- 1) Après avoir informé l'entreprise sélectionnée et volontaire, des dispositions prévues ci-dessous et recueilli son accord écrit, l'AST effectuera les prélèvements atmosphériques avec un personnel qualifié dans le respect des méthodes définies par l'INRS et les CARSAT, figurant dans le fichier METROPOL (Métrologie des Polluants sur www.inrs.fr).
- 2) La transmission des échantillons au Laboratoire se fera suivant la procédure définie par le LICT, avec notamment l'ensemble des informations nécessaires à l'enregistrement des données dans la base de gestion COLCHIC du Laboratoire.
- 3) Les résultats d'analyse seront transmis par le Laboratoire à la toxicologue de l'AST, avec copie à l'agent de secteur du service prévention de la CARSAT ayant en charge le suivi de l'établissement.
- 4) Dans les situations pour lesquelles les analyses mettront en évidence un risque grave pour la santé des opérateurs (dépassement des VLEP, agent CMR), l'AST informera le Laboratoire des suites données par l'entreprise.
- 5) Les prestations fournies par la CARSAT ne feront l'objet d'aucune facturation à l'AST et de ce fait ne seront pas facturées à l'entreprise.

Si vous ne souhaitez pas confier cette prestation au LICT, nous pouvons demander un devis au laboratoire **ToxiLabo**. Dans ce cas, les coûts des analyses seront à votre charge.

Pouvez-vous svp me retourner cette proposition d'intervention avec collaboration avec le laboratoire de votre choix pour les analyses signée si vous la validez. Je vous recontacterai ensuite afin de planifier les mesures.

Mesures	Laboratoire	Choix (oui/non)	Date	Signature
Atmosphériques	LICT (CARSAT)			
	ToxiLabo			

Les prélèvements devront être réalisés durant une journée de travail complète en situation représentative des conditions habituelles.

Nous vous prions de recevoir nos sincères salutations et restons à votre écoute pour toute question relative à cette campagne.

Annexe 8 : Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 1

Les étapes de la fabrication d'un châssis de camion sont les suivantes :



Soudage sur le marbre

- Relevé des côtes sur le camion pour la réalisation du plan du châssis ;
- Nettoyage à l'eau ;
- Débitage des pièces nécessaires à la scie à ruban manuelle (le salarié est aidé par un collègue pour cette tâche) ;
- Réalisation de trous sur les pièces du châssis à la perceuse ;
- Disposition des pièces sur le marbre (support pour l'assemblage du châssis) ;
- Soudage des différentes pièces (points de soudure suivis de cordons) ;

À la fin du soudage, le châssis est disposé sur des tréteaux en métal à l'aide du pont roulant pour que son collègue puisse finaliser les soudures du châssis.

Le procédé de soudage utilisé est le MAG (argon dioxyde de carbone alimenté en fil plein en acier SUPRAMIG (Lincoln Electric).

Le jour des prélèvements, le salarié a soudé environ 3h, ce qui est représentatif de son activité habituelle (entre 3h et 3h30).

Le soudage MAG émet des grattons qui sont des projections de métaux émises durant le soudage. Leur retrait est effectué au burin et aux ciseaux à bois.

Annexe 9: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 2

Son poste consiste à finaliser la confection des châssis de camion. Ainsi, son activité se déroule de la manière suivante :

- Il débite à l'aide d'une scie à ruban manuelle les pièces dont il a besoin pour la réalisation du châssis avec son collègue ;
- Il réalise des trous sur certaines pièces du châssis à l'aide d'une pointeuse (même opération que pour le soudeur principal) ;
- Il effectue des opérations de meulage pour avoir les pièces aux bonnes dimensions.

À noter qu'il ne porte pas de protection respiratoire (visière seulement) pendant cette opération et qu'il existe une **co-exposition importante** aux fumées de soudage (proximité immédiate du soudeur principal).

- Il place les pièces supplémentaires sur le châssis préalablement posé sur les tréteaux ;
- Il soude toutes les pièces ensemble et consolide le châssis.



Soudage MAG poste suite confection châssis

À l'instar du poste soudage marbre principal, il soude à l'arc semi-automatique fonctionnant à l'argon et au dioxyde de carbone et alimenté en fil plein en acier SUPRAMIG Lincoln Electric. Il soude en moyenne entre 3h et 4h par jour.

Concernant le nettoyage, il balaie l'atelier une à deux fois par jour.

Annexe 10: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 3

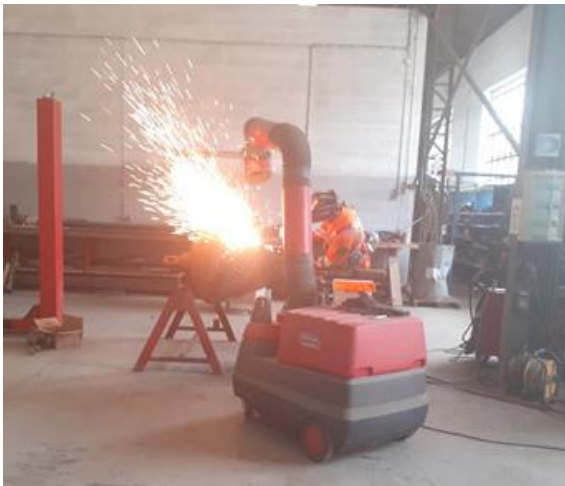
Le mécanicien réalise diverses activités à l'atelier : gestion de la maintenance et de l'entretien du parc engins et des véhicules, organisation des travaux d'entretien du matériel etc.

Il peut être amené à réaliser ponctuellement des opérations de soudage et de découpe au chalumeau (oxygène acétylène) notamment pour l'entretien des aléseurs ou encore la réalisation d'objets comme des passerelles, etc.

Les caractéristiques du poste de soudage présent dans l'atelier sont les suivantes :

- Type de soudage réalisé : MAG sur acier.
- Le gaz de soudage utilisé est l'ARCAL SPEED (Ar + CO₂).

Les prélèvements ont été réalisés sur une matinée de travail. Le salarié a effectué l'entretien de deux aléseurs (soudage MAG + découpe chalumeau oxygène acétylène). L'entretien de l'alésieur consiste à le déposer sur des tréteaux pour être réparé. Ensuite, l'opérateur découpe les dents abîmées (découpe au chalumeau oxyacétylénique) puis soude des nouvelles dents, il réalise du rechargement pour solidifier la pièce. Au retour de chantier, les aléseurs peuvent être couverts de poussière et de rouille.



Soudeur en action avec le bras aspirant mobile



Les aléseurs en cours de soudage

Le temps de soudage et de découpe au chalumeau représente 2h30 de travail.

Le reste de la matinée, l'opérateur a déchargé une semi-remorque pendant 30 min, puis réalisé des tâches d'entretien sur les véhicules (démontage des jantes, contrôle de chariots etc.).

Annexe 11: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 4



Pointage sur châssis latéral en acier

Les prélèvements ont été réalisés sur une journée de travail. Le salarié a effectué l'assemblage et le pointage de châssis latéral en acier. Le procédé de soudage utilisé est le soudage MAG.

Concernant les équipements de protection collective :

L'atelier n'est pas équipé d'une ventilation mécanique générale.

Il y a néanmoins la présence de grande porte qui était ouverte le jour des prélèvements.

Concernant les équipements de protection individuelle :

Le salarié porte une cagoule ventilée entretenu régulièrement.

Annexe 12: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 5

Le soudeur 5 a procédé au soudage du châssis central en acier, avec un soudage MAG. Il est amené à réaliser des tâches de meulage. Deux postes de soudage avec torche aspirante sont présents dans cette zone. Le jour des mesures, le soudeur était seul dans le box. L'opérateur a réalisé le soudage de plus petites pièces sans torche aspirante dans un autre box pendant quelques minutes. Son box est situé en extrémité du pôle soudage à proximité des portes ouvertes vers l'extérieur.



Soudage sur châssis central

Concernant les équipements de protection collective :

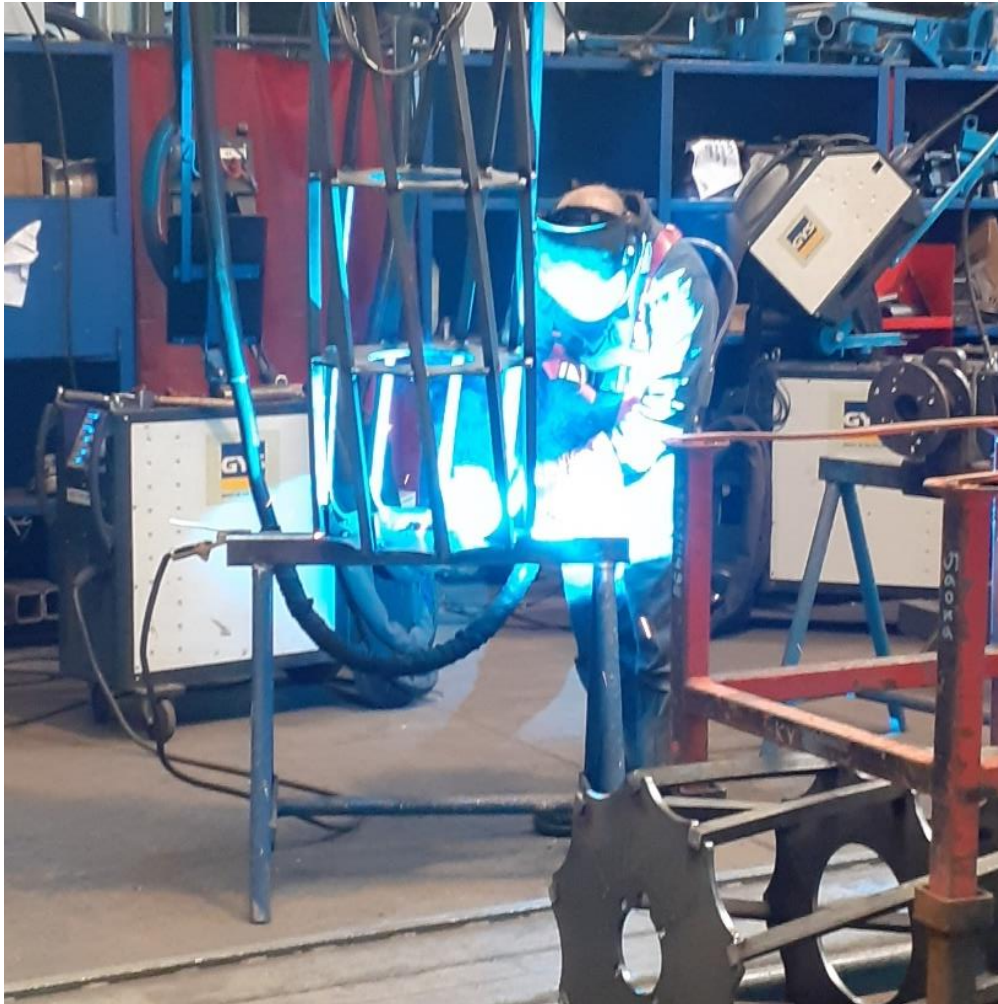
L'opérateur avait à disposition dans son box une torche aspirante afin de souder. Cependant, il a effectué des opérations de soudage dans un autre box pour des raisons de taille de la pièce à souder celle-ci étant trop volumineuse, ce box ne possédait pas de torche aspirante.

Concernant les équipements de protection individuelle :

Le salarié ne porte pas de cagoule ventilée, il a simplement une cagoule de soudage afin d'éviter les coups d'arc (photokératite) induit par les rayonnements UV émis par le soudage.

Annexe 13: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 6

Les prélèvements ont été réalisés sur une journée de travail. Le salarié a effectué le soudage sur un rouleau en acier. Le procédé de soudage utilisé est le soudage MAG.



Soudage sur rouleau en acier

Concernant les équipements de protection collective :

L'opérateur soude avec un procédé équipé d'une torche aspirante.

Concernant les équipements de protection individuelle :

Le salarié ne porte pas de cagoule ventilée, il a simplement une cagoule de soudage afin d'éviter les coups d'arc (photokératite) induit par les rayonnements UV émis par le soudage.

Annexe 14 : Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 7

Le salarié a effectué divers soudages, de pièces en acier, qui serviront par la suite à l'assemblage des pièces afin de confectionner les engins agricoles. Le procédé de soudage utilisé est le soudage MAG.



Soudage de pièce en acier

Concernant les équipements de protection collective :

L'atelier n'est pas équipé d'une ventilation mécanique générale.

Il y a néanmoins la présence de grandes portes qui étaient ouvertes le jour des prélèvements.

Concernant les équipements de protection individuelle :

Le salarié ne porte pas de cagoule ventilée, il a simplement une cagoule de soudage afin d'éviter les coups d'arc (photokératite) induit par les rayonnements UV émis par le soudage.

Annexe 15: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 8



Table aspirante

L'opérateur soude ses pièces au-dessus d'une table aspirante. Les tables aspirantes sont des bancs de travail combiné à une unité d'extraction, spécialement dédiées pour l'élimination des fumées de soudage dès l'origine.

Le soudeur 8 a soudé le jour des mesures de très grosses pièces, la puissance de son appareil était donc plus importante. Le procédé de soudage utilisé est le soudage MAG.

Concernant les équipements de protection collective :

L'opérateur soude au-dessus d'une table aspirante. Le nettoyage de la table s'effectue par l'opérateur en fin de semaine.

Concernant les équipements de protection individuelle :

Le salarié ne porte pas de cagoule ventilée, il a simplement une cagoule de soudage afin d'éviter les coups d'arc (photokératite) induit par les rayonnements UV émis par le soudage.

Annexe 16: Descriptif de l'activité réalisée par les soudeurs 9 et 10

Lors des mesures, une équipe avait en charge la fabrication d'un bac en acier pour le lavage des roues des camions en sortie de chantier. Pour cela, les soudeurs 9 et 10 ont meulé et soudé (MIG). Pour le soudeur 10, il y a eu également une découpe plasma manuelle.



Fabrication bac en acier



Découpe plasma manuelle par le soudeur 10

L'atelier ne dispose pas d'EPC. Les EPI des soudeurs se limitent aux masques de soudeur.

Annexe 17: Descriptif de l'activité réalisée par le soudeur 11

Le soudeur 11 avait pour tâche le montage d'un pochoir. Pour cela, il a meulé et soudé (MIG).



Montage d'un pochoir

L'atelier ne dispose pas d'EPC. Les EPI du soudeur, comme les soudeurs précédents se limitent à un masque de soudeur.

Annexe 18 : Prélèvements individuels des principaux polluants retrouvés chez les soudeurs en mg/m³

	Prélèvements individuels des principaux polluants retrouvés chez les soudeurs en mg/m ³												
	Soudeur 1	Soudeur 2	Soudeur 1 bis	Soudeur 2 bis*	Soudeur 3	Soudeur 4	Soudeur 5	Soudeur 6	Soudeur 7	Soudeur 8	Soudeur 9	Soudeur 10	Soudeur 11
Fumées de soudage	1.90	13.9	1.44	7.22	2.64	2.17	1.91	3.67	1.85	0.57	4.43	4.40	3.15
Fer	0.62	3.05	0.26	2.09	1.34	1.34	0.99	2.22	1.12	0.24	2.52	2.49	1.65
Manganèse	0.026	0.61	0.029	0.165	0.086	0.052	0.072	0.17	0.051	0.014	0.15	0.11	0.15
Aluminium											0.028	0.030	0.021
Cuivre		0.047		0.06	0.013			0.006			0.012	0.009	0.006
Zinc			0.005	2.45	0.030	0.006	0.008	0.009	0.008		0.009	0.009	0.005
Plomb		0.012		0.0036									
Titane				0.003									
Tungstène					0.017								
Poussières fraction alvéolaire	0.26	8.34	1.21	4.95	0.44	0.60	0.33	0.34	0.37	0.87	0.26	1.11	1.07

CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION DES SALARIÉS À LA FRACTION ALVÉOLAIRE DES FUMÉES DE SOUDAGE

Les **fumées de soudage (FS)** représentent un risque professionnel important pour les **soudeurs**. Chargées d'agents cancérogènes tels que le chrome VI ou le nickel, il est capital de protéger les travailleurs de ces émanations. Les FS sont composées de particules de taille ultrafine, or la protection des salariés passe par le respect du niveau d'exposition à la **fraction inhalable** des FS. L'ANSES propose une nouvelle **VLEP** des **PSES** fraction alvéolaire à $0,9\text{mg}/\text{m}^3$. L'objectif de ce mémoire est de caractériser l'exposition des salariés à la **fraction alvéolaire** des FS. Dans ce but, nous avons tout d'abord présenté les FS, particulièrement leur toxicité pour les travailleurs. Puis, nous avons effectué des prélèvements en suivant une méthodologie de repérage des expositions professionnelles aux FS. Les mesures effectuées ont montré qu'il existait un large dépassement pour la fraction alvéolaire des FS de la valeur seuils. On rappelle que ces valeurs ont été comparées à la VLEP-8h fraction alvéolaire des PSES. Il paraît indispensable de se pencher sur la problématique de l'exposition à la fraction alvéolaire des fumées de soudage.

Mots-clés : **Fumées de Soudage (FS), fraction alvéolaire, fraction inhalable, PSES, VLEP, soudeurs.**

CHARACTERIZATION OF EMPLOYEE EXPOSURE TO THE ALVEOLAR FRACTION OF THE WELDING FUMES

Welding fumes (WF) represent a significant occupational hazard for **welders**. Loaded with carcinogens such as chromium VI or nickel, it is essential to protect workers from these fumes. WF are composed of ultrafine particle sizes, nevertheless the protection of employees depends on compliance with the level of exposure to the **inhalable fraction** of welding fumes. ANSES proposed a new **occupational exposure limit values (OEL)** of **dust with no specific effect** alveolar fraction at $0.9\text{mg}/\text{m}^3$. The objective of this thesis is to characterize the exposure of employees to the **alveolar fraction** of WF. To this end, firstly we presented WF, especially their toxicity to workers. Secondly, samples were taken using a methodology for identifying occupational exposures to WF. The measurements made showed that there was a large exceedance for the alveolar fraction of the WF from the threshold values. It is recalled that these values were compared to the alveolar fraction OEL-8h of dust with no specific effect. It seems essential to examine the problem of exposure to the alveolar fraction of the welding fumes.

Key-words : **Welding Fumes (WF), alveolar fraction, inhalable fraction, dust with no specific effect, occupational exposure limit values (OEL), welders.**