35èmes JOURNÉES NATIONALES DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP

un nouveau souffle dans le BTP

LES PARTICULES FINES

du 22 au 24 MAI 2019

METZ
Centre des Congrès Robert Schuman

Exposition aux fumées de soudage et surveillance biologique

Dr Renaud PERSOONS, Pr Anne MAITRE

Laboratoire de Toxicologie Professionnelle et Environnementale

Equipe de Médecine et Santé au Travail

CHU Grenoble Alpes, Université Grenoble Alpes

Contacts: RPersoons@chu-grenoble.fr

https://biologie.chu-grenoble.fr/toxicologie-professionnelle-et-environnementale

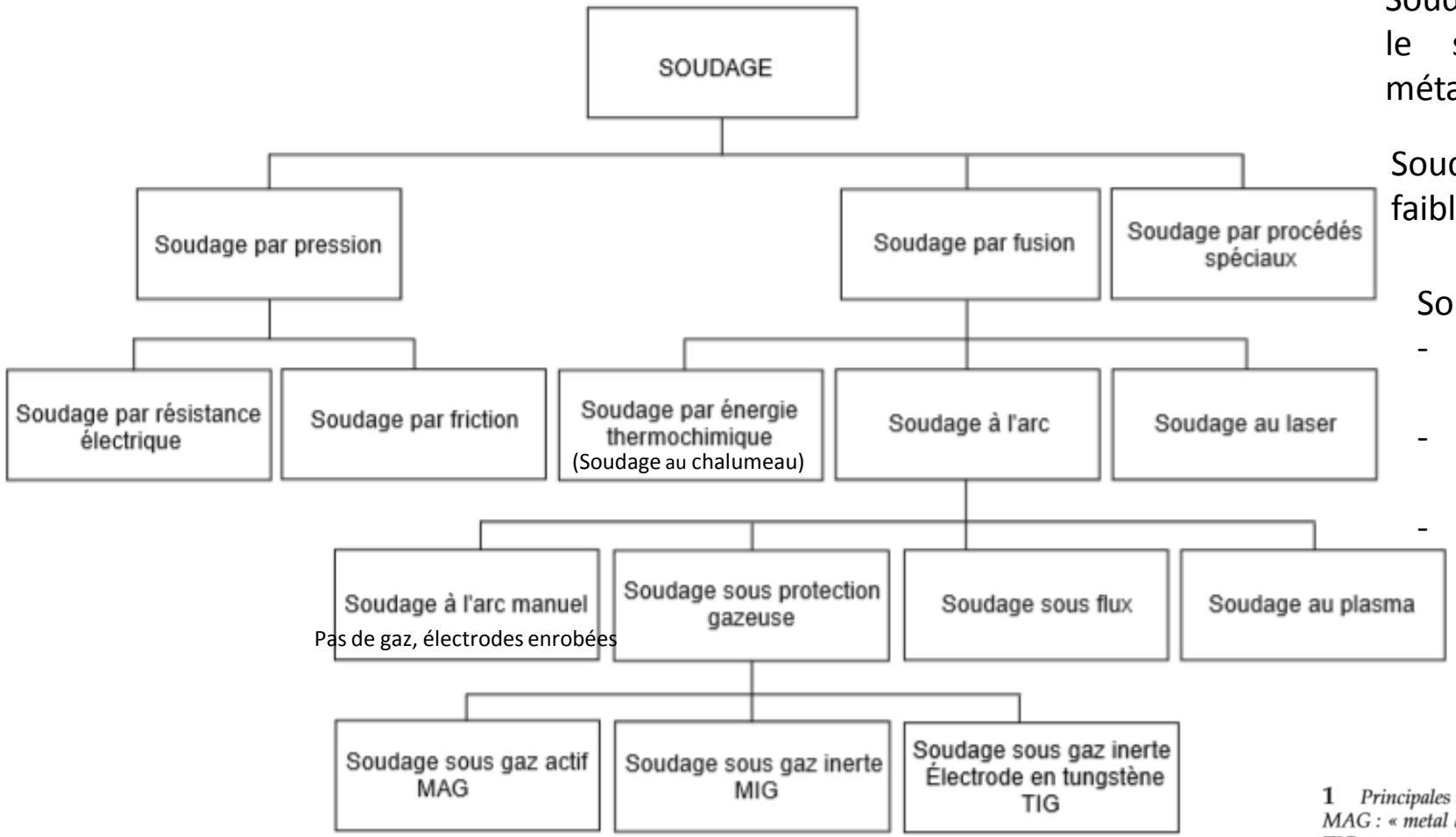
Figure 10. **Opération de soudage à l'arc avec électrodes enrobées**

Figure 12. **Opération de soudage à l'arc sous protection gazeuse**

SIST BTP Service Interentreprises de Santé au Travail Lorraine

GNMST BTP GROUPEMENT NATIONAL MULTIDISCIPLINAIRE DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP

Diversité des techniques de soudage



(Thaon et al, EMC, 2016)

Soudage au chalumeau (acétylène): moins utilisé pour le soudage, utile dans l'oxycoupage, brasage, métallisation, trempe

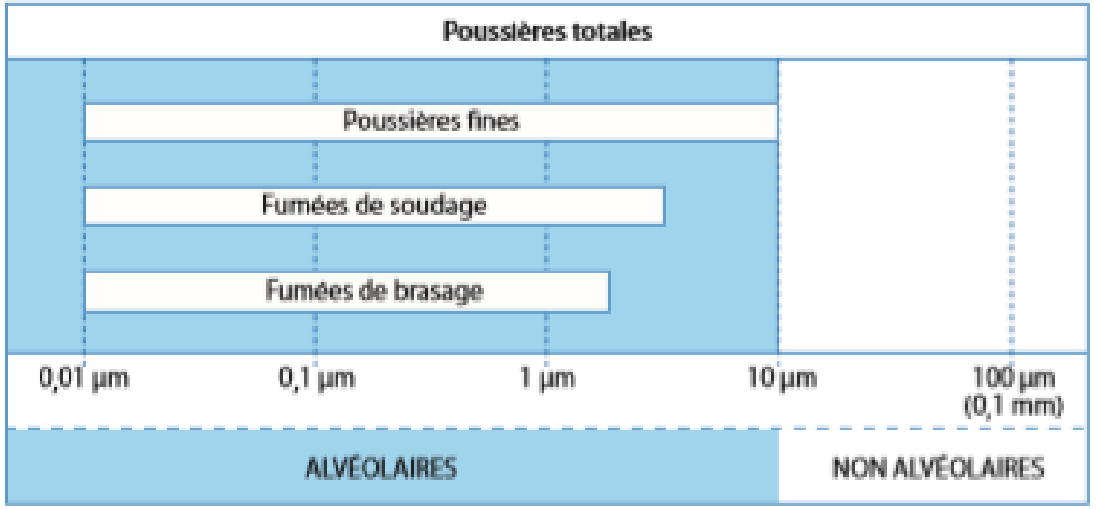
Soudage à l'arc manuel: convient aux aciers doux, faiblement alliés, aciers inox, métaux non ferreux

Soudage sous protection gazeuse:
- MAG: aciers doux, aciers faiblement alliés, métaux ferreux, aciers galvanisés / zingués
- MIG: aciers alliés, inox, fonte, aluminium, manganèse, nickel, aciers réfractaires
- TIG: très répandu car convient à la plupart des métaux

Soudage au plasma: soudage automatique de pièces de grande épaisseur (forte énergie générée par plasma)

1 *Principales techniques de soudage.*
MAG : « metal active gas » ; MIG : « metal inert gas » ; TIG : « tungsten inert gas ».

Fumées de soudage et particules fines



Source BGI 593

Figure 3. **Les dimensions et la morphologie des particules, chaînes et agglomérats générés lors de la mise en œuvre de deux procédés de soudage**

Procédés	Matériaux	Particules, chaînes et agglomérats			
		Morphologie des particules	Taille		
			Particules primaires (diamètre)	Chaînes (longueur)	Agglomérats (diamètre)
Soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées	Acier CrNi	Sphérique	Jusqu'à 50 nm	Plusieurs µm	Jusqu'à 500 nm
			Jusqu'à 400 nm	Plusieurs µm	Jusqu'à 500 nm
Soudage sous gaz protecteur (MAG/MIG)	Acier CrNi	Sphérique	Jusqu'à 10 nm	Jusqu'à 100 nm	Jusqu'à 100 nm
	Alliages d'aluminium	Sphérique	De 10 à 50 nm	–	–
			Jusqu'à 400 nm	–	–

Source: INRS, ED 6132, Octobre 2018

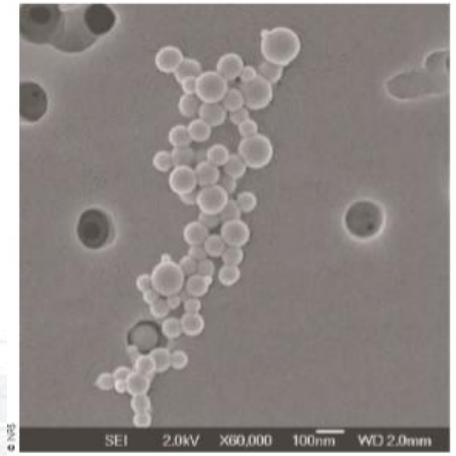


Figure 4. **Fumées de soudage observées en microscopie**

Particules solides métalliques et d'oxydes métalliques: diamètre < 1 µm, voire < 100 nm ⇨ **Particules UltraFines (PUF)** susceptibles d'atteindre le poumon profond et de passer dans la circulation sanguine

Tendance à la **formation de chaines et d'agglomérats**

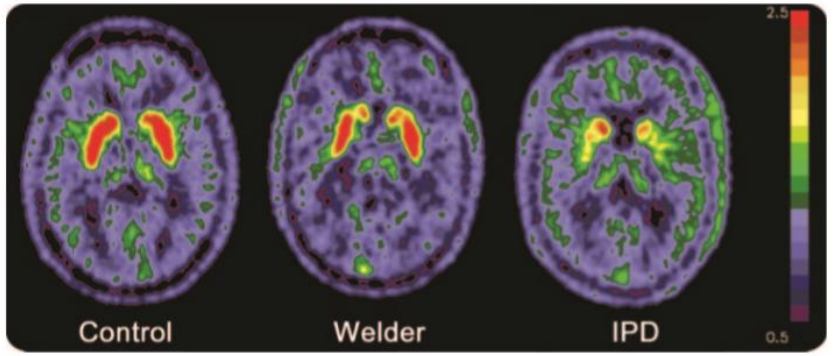
Toxicité des fumées de soudage

- **Troubles oculaires** (brûlures oculaires, cataractes, kératoconjonctivites)
- **Pathologies respiratoires** non cancérogènes (altération fonction pulmonaire, irritation VAS, pneumoconioses, asthme, BPCO)
- Effets neurologiques (**syndromes pseudo-parkinsoniens**)
- **Effets cancérogènes**:
  - Excès de **cancers bronchopulmonaires primitifs** (~30-50%) retrouvés chez des soudeurs dans plusieurs études épidémiologiques (après ajustement sur le tabac et l'exposition à l'amiante)
  - Classement **CIRC** (2017) des fumées de soudage comme agents cancérogènes pour l'Homme (**Group 1**) *(« sufficient evidence for lung cancer, limited evidence for kidney cancer »)*
- Fortes indications d'**effets inflammatoires chroniques et immunosuppresseurs** *(IARC 2018)*

Fumées de soudage et Neurotoxicité

- Syndromes pseudo-parkinsoniens mis en évidence chez des soudeurs exposés de façon chronique à de faibles concentrations de Mn
- Neurotoxicité du Mn déjà établie (parkinsonisme)
- ⤵ du taux d'absorption de dopamine cérébrale (noyau caudé < putamen antérieur < putamen postérieur) chez soudeurs exposés au Mn par rapport à des témoins, avec taux sériques de Mn doublés et signaux caractéristiques à l'imagerie (*Criswell et al, 2011*)

Figure 2 FDOPA PET images of decay-corrected counts from 24 to 94 minutes



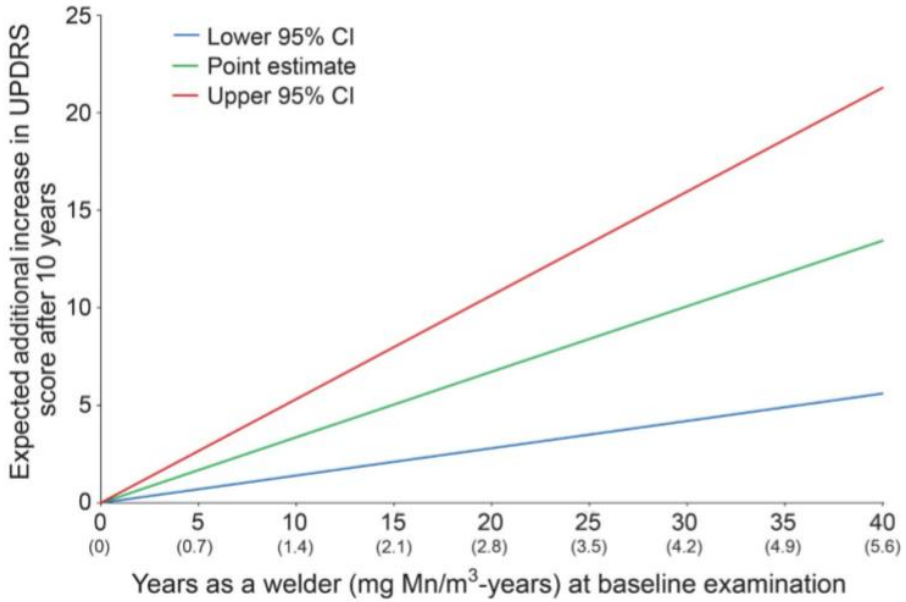
FDOPA PET composite images of decay-corrected counts from 24 to 94 minutes from a representative control, welder, and subject with idiopathic Parkinson disease (IPD) normalized to the reference region. FDOPA uptake is reduced in the caudate region of the welder in comparison to the control subject while the posterior putamen is the most affected region in the subject with IPD.

Fumées de soudage et Neurotoxicité

- Aggravation de la symptomatologie du parkinsonisme (bradykinésie membre sup, rigidité membres sup et inf, détérioration parole et expression faciale) en fonction de l'exposition cumulée au Mn chez des soudeurs (*Racette et al, 2017*)

- Diminution des performances cognitives avec corrélation inversée en fonction de l'exposition au Mn chez des soudeurs (*Al-Lozi et al, 2017*)

Figure Increase in Unified Parkinson's Disease Rating Motor Scale 3 (UPDRS3) score due to welding fume exposure by years as a welder



Polluants générés dans les fumées de soudage

- Polluants **particulaires**
  - Particules ultrafines de diamètre généralement < 1 µm incluant oxydes métalliques (oxydes de Fe / Cd / Cr / Al / Fe / Ni / Mn / Be / Co / Zn…), silicates, fluorides (*IARC, 2018*)
  - ⇨ **95% des fumées proviennent des produits d'apport (fil, électrode fusible, baguette) !**

- Polluants **gazeux**:
  - Gaz émis par l'opération de soudage: **monoxyde de carbone (CO), Oxydes d'azote (NO, NO_2), Ozone (O_3)**
  - Gaz émis par la dégradation thermique ou photochimique de revêtements éventuellement présents sur les pièces: phosgène ($COcl_2$), Chlorure d'Hydrogène (HCl), formaldéhyde, TDI, HCN, benzène, styrène, xylène, pyrène, bisphénol A,…
  - Gaz protecteurs (Ar, He)

Table 1.1 Occupational exposures of welders that have been evaluated by the *IARC Monographs*

Agent	Evidence for carcinogenicity		Overall evaluation	Most recent volume (year)	Occurrence	Welding types	Organ sites (sufficient or limited evidence in humans)
	Humans	Animals					
Arsenic and inorganic arsenic compounds	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Impurity in some mild SS welding fumes	All	Lung, skin, urinary bladder, prostate, kidney, liver
Asbestos	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Insulation material and in heat-protective equipment of welders and the weld	Shipyard welding	Mesothelioma, larynx, lung, ovary, pharynx, stomach, colon, rectum
Beryllium and beryllium compounds	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Hardening agent in copper, magnesium, aluminium alloys and electrical contacts	GMA, GTA	Lung
Cadmium and cadmium compounds	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Platings on base metals, SS containing cadmium	All	Lung, kidney, prostate
Chromium VI compounds	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Alloy in SS, also in welding rods	All SS	Lung, nasal sinuses, nose
Electric fields, extremely low frequency	Inadequate	No relevant data	3	80 (2002)	Electrical currents from welding processes	All (more with processes using higher currents, such as resistance welding)	
Formaldehyde	Sufficient	Sufficient	1	100F (2012)	Metal coatings, degreasing solvents	All	Nasopharynx, nasal sinuses, leukaemia,
Inorganic lead compounds	Limited	Sufficient	2A	87 (2006)	In solder, brass, and bronze alloys; welding on lead-containing or -coated materials	GMA, GTA	Stomach
Magnetic fields, extremely low frequency	Limited	Inadequate	2B	80 (2002)	Electrical currents from welding processes	All (more with processes using higher currents, such as resistance welding)	Childhood leukaemia
Nickel compounds	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Alloy in SS, also in welding rods	All SS	Lung, paranasal sinuses, nasal cavity
Silica dust or crystalline, in the form of quartz or cristobalite	Sufficient	Sufficient	1	100C (2012)	Some welding fluxes contain silica	GMA, FCA, GTA	Lung
Titanium dioxide	Inadequate	Sufficient	2B	93 (2010)	Found in SMA (MMA) electrodes	SMA (MMA)	
Ultraviolet radiation	Sufficient	Sufficient	1	100D (2012)	Arcs from welding guns	All	Ocular melanoma
Iron oxides (evaluation specific to iron and steel founding)	Sufficient	Inadequate	1	100F (2012)	Main component of steel	All	Lung
Vanadium pentoxide	Inadequate	Sufficient	2B	86 (2006)	Alloy in SS	All SS	
Outdoor air pollution ($PM_{2.5}$)	Sufficient	Sufficient	1	109 (2016)	$PM_{2.5}$ generated from all welding processes	All	Lung
Welding fume	Limited	Inadequate	2B	49 (1990)	Generated from welding processes	All	Lung

FCA, flux cored arc; GMA, gas metal arc; GTA, gas tungsten arc; MMA, manual metal arc; PM, particulate matter; SMA, shielded metal arc; SS, stainless steel

Table 1.2 Welding processes, materials, and uses

Welding type	Primary exposures encountered	Common industrial uses	Most common base metals welded
Oxyfuel	NO_2	Repair/maintenance	MS[a], AS
MMA	Metals, silicates, fluoride, asbestos[b], UV radiation, ELF-EMF	Steel fabrication, construction	MS[a], SS, AS
GMA	Metals, O_3, NO_2, CO, chlorinated HC, UV radiation, ELF-EMF	Various metal fabrication	MS[a], SS, AS, Al
FCA	Metals, CO_2, UV radiation, ELF-EMF	Equipment repair, shipbuilding	MS[a], SS, AS
GTA	O_3, NO, NO_2, metals, chlorinated HC, UV radiation, ELF-EMF	Aerospace, bicycle manufacturing, various metal fabrication	MS, SS[a], AS, Al
SA	Fluorides, UV radiation, ELF-EMF	Steel fabrication, shipbuilding	MS[a], SS, AS
ER	Metals, UV radiation, ELF-EMF	Aerospace, automobile, shipbuilding	MS, SS, AS, Al
Brazing/soldering	Metals, UV radiation	Metal arts, plumbing, electric components	All metals/steels
Cutting/gouging	Metals, O_3, NO_2, UV radiation	Fabrication, construction, shipbuilding	All metals/steels

Table 1.3 Type of welding and material welded by both welders and non-welders reporting welding activities, as included in the ECRHS II study

Type of welding or metal	Proportion associated with various processes/metal welded	
	Welders (n = 27 job periods held during 1969–2001, 23 subjects) (%)	Non-welders (n = 388 job periods held during 1962–2001, 340 subjects) (%)
Type of welding		
MMA	70.4	66.2
GMA	81.5	48.7
GTA	40.7	20.0
SA	11.1	5.2
FCA	25.9	16.0
Other (includes oxyfuel)	10.1	19.6
Type of metal		
Stainless steel	55.6	33.5
Mild steel	85.2	63.9
Galvanized steel	74.1	60.0
Aluminium	48.1	17.5
Painted metal	40.7	47.2
Other	3.7	21.6

Source: monographie CIRC fumées de soudage (2018)

Emissivité des procédés de soudage

Technique de soudage	Principaux polluants émis	Débits d'émission de fumées
Soudage à la flamme	Oxydes d'azote (NO, NO_2)	
Soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées	Oxydes de Fe / Mn / Si / Ti / Al si électrodes en aciers faiblement allliés Oxydes de Fe / Cr / Ni si électrodes en aciers fortement alliés (dont **composés du Cr^{VI}**)	4-18 mg/s (aciers non / faiblement alliés) 2-22 mg/s (aciers alliés)
Soudage à l'arc sous protection gazeuse sous gaz actif (MAG)	Fortes émissions, proches de celles du soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées + ozone (**composés du Cr^{VI}** si Acier Inox **fil fourré**)	2-12 mg/s (aciers non / faiblement alliés)
Soudage à l'arc sous protection gazeuse sous gaz inerte (MIG)	Techniques nettement moins émissives (CO, Cr^{III} lors de soudage MAG sur aciers fortement alliés)	2-6 mg/s (aciers alliés)
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire (TIG)	Oxydes de Fe / Ni / Al, Ozone	Emissions de fumées relativement faibles, mais élevées d'ozone
Soudage par résistance	Oxydes métalliques	Débits modérés
Oxycoupage	Oxydes de Fe et d'azote	10-50 mg/s

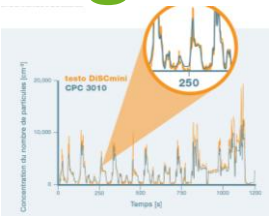
Emissivité des procédés de soudage

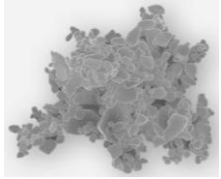
- Facteurs influençant la composition et l'émissivité des fumées de soudage:
  - **Procédé** de soudage
  - Diamètre du fil / de l'électrode (produit d'apport) et quantité journalère consommée
  - **Composition / épaisseur de l'enrobage** ou du flux (fils fourrés)
  - Paramètres de soudage (intensité, longueur d'arc…)
  - **Position de soudage** (postures contraignantes (couché), milieu confiné)
  - Débit et composition du gaz protecteur (MAG, MIG)
  - Composition du métal de base
  - **Présence de revêtements ou de contaminants** sur le métal de base

- Autres activités génératrices de fumées: **meulage, brasage, coupage, projection thermique…**

Comment surveiller l'exposition aux fumées de soudage ?

- **Métrologie atmosphérique**:
  - Analyse des **nanoparticules** (masse, nombre/cm^3, taille, observation morphologique par µscopie à balayage)





  - Analyse des principaux **métaux toxiques** (Cr dont Cr^{VI}, Ni, Mn) +/- Cd, Be… par spectrométrie à rayons X ou ICP-MS
  - Analyse des polluants gazeux (**Ozone, CO, NO, NO_2**) +/- gaz spécifiques si suspicion de dégradation thermique ou photochimique de revêtements

Comment surveiller l'exposition aux fumées de soudage ?

- **Surveillance biologique**:
  - **Biomarqueurs d'exposition**:
    - Urines: Chrome, Nickel, Manganèse
    - Sang: Manganèse
    - Condensat d'air exhalé

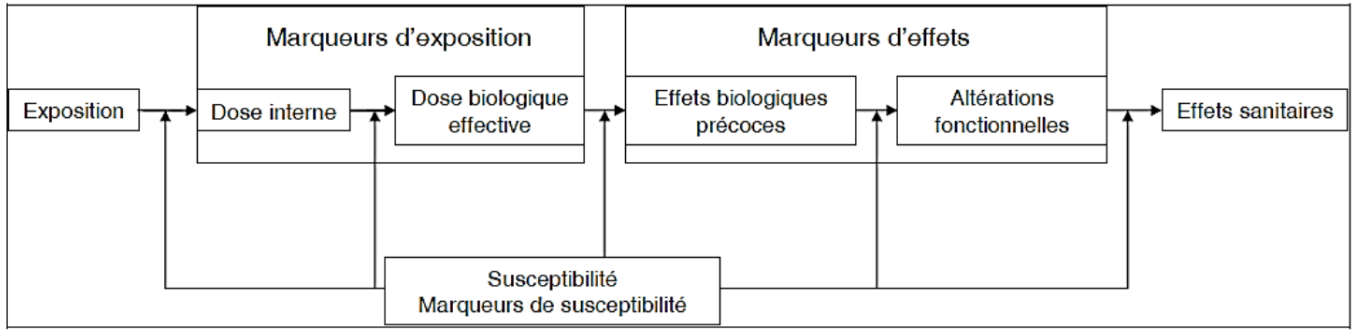


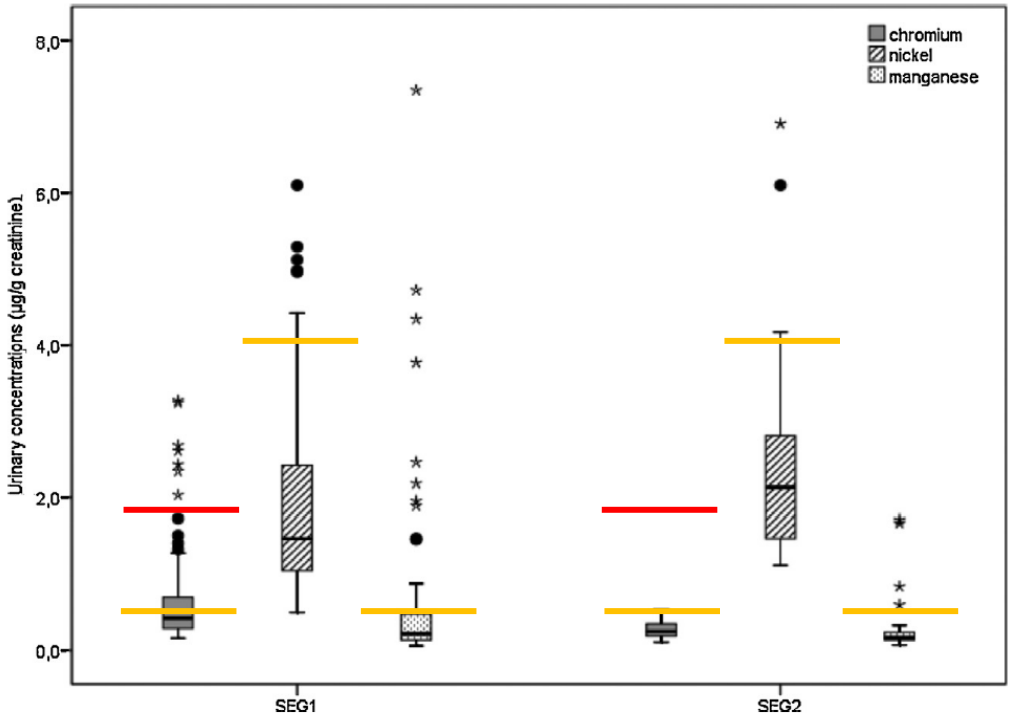
Figure 1. Continuum exposition – effets sanitaires (ANSES 2014)

  - **Biomarqueurs d'effets**:
    - *Fortes indications* **Inflammation** :⇗ leucocytes, ⇗ PN neutrophiles, ⇗ CRP, ⇗ cytokine CCL3, ⇗ 8-isoprostane *(Nuernberg 2008, Palmer 2006)* mais manque de spécificité
    - *Indications modérées* **Génotoxicité**: Micronoyaux, cassures brins d'ADN, dommages oxydatifs à l'ADN *(IARC, 2018)* mais mesures peu précises et manque de spécificité
    - *Indications modérées* **Stress oxydatif** (⇗ 8oxoDG & Peroxyde d'Hydrogène, 8-isoprostane, ⇗ MDA, ⇘ Glutathion, ⇘ anti-oxydants plasmatiques (Vit. C/E) et sanguins (SOD) *(Zhu 2004) (Li 2004) (Marie-Desvergnes 2018)*
  - **Etude métabolomique**

Valeurs Biologiques d'Interprétation (VBI)

Biomarqueur	Valeur milieu professionnel	Valeur population générale (95° percentile)
Chrome urinaire	< 1,8 µg/g créatinine (Cr^{VI}) (ANSES, 2017)	< 0,5 µg/g créatinine (ANSES, 2017)
Chrome sanguin (érythrocytaire)	Non (recherche)	< 1 µg/L
Nickel urinaire	6 ou 12 µg/L (FIOH) (sels solubles ou peu solubles)	< 4 µg/g créatinine (INVS, 2011)
Manganèse urinaire	Non	< 0,5 µg/g créatinine (NHANES, 2018)
Manganèse plasmatique	2 µg/L (Hoet et al, 2012)	< 1 µg/L (Cesbron, 2013)

SBEP métaux chez 132 soudeurs MIG/MAG français *(Persoons et al, 2014)*



Graph 1. Box and whisker plots of urinary Cr,Ni and Mn concentrations (µg/g of creatinine) in welders of SEG_1 (SMEs) and SEG_2 (a large enterprise).

Table 4
Predictors of urinary Cr, Ni and Mn concentrations in 110 welders of SEG_1.

Variables	SEG_1 ($n=110$)					
	Ln (urinary Cr)		Ln (urinary Ni)		Ln (urinary Mn)	
	β	P value	β	P value	β	P value
Age	0.017	**		NS	0.022	**
Welding experience		NS	0.011	*		
Welding in confined spaces	0.656	**		NS	0.832	**
High physical workload		NS		NS	−0.587	*
Welding technique (MAG versus MIG)		NS	0.222	Δ		
Welding mild steel base metal	−0.798	***	−0.349	*		
Welding duration during the week (h)	0.016	**		NS	0.019	*
Grinding duration during the week (h)	0.026	Δ	0.027	*	0.108	***
Presence of a mechanical ventilation	−0.369	**		NS		
Smoking during working hours	0.182	Δ		NS	0.322	Δ
Intercept	−1.084		0.327		−3.002	
R^2	52%	22%	38%			

Δ: Close to significance ($0.05 \le p < 0.1$).
* $0.01 \le p < 0.05$.
** $0.001 \le p < 0.01$.
*** $p < 0.001$.

- Concentrations urinaires << valeurs maximales admissibles en milieu professionnel mais > valeurs population générale
- Influence sur les concentrations urinaires de l'**âge** des sujets, du **nb d'années de soudage**, du travail en **milieu confiné**, de la **charge physique**, du **procédé** de soudage, de la **composition du métal d'apport / de base**, de la présence de **ventilation à la source**, du **nombre d'heures de soudage / meulage la semaine** de la surveillance biologique

SBEP soudeurs et biomarqueurs prometteurs

- **Manganèse sanguin**:

  - Lien entre les niveaux de Mn sanguins et les niveaux atmosphériques retrouvés pour des périodes d'exposition > 1 mois (*Baker et al, 2016*)

  - Valeur seuil de 2 µg/L de **Mn plasmatique** en J1FP permettrait de distinguer une exposition respiratoire au Mn (fraction alvéolaire) < ou > 20 µg/m3 (valeur ACGIH) avec une bonne sensibilité (69%) et spécificité (82%) (*Hoet et al, 2012*)

  - Difficulté d'interprétation des taux de Mn (sang, urines) du fait d'une variabilité importante et d'un **mécanisme de régulation homéostatique**

- Manganèse capillaire:

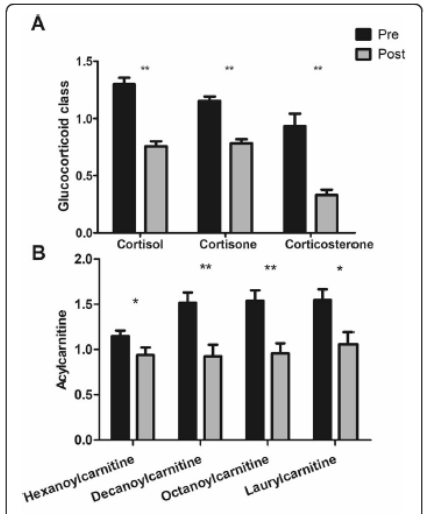
  - Influence moindre de la variabilité de l'exposition récente au Mn (par rapport au MnS ou MnU) du fait d'une croissance lente.

  - Bonne corrélation entre les niveaux atmosphériques individuels moyennés sur les 30 derniers jours ($[Mn_{atm}]_{30j}$) et les niveaux de Mn capillaire (*Reiss et al, 2016*)

  - difficulté de mise en pratique et de trouver un laboratoire d'analyses…

Fumées de soudage et profils métabolomiques

- «Welding fume exposure is associated with inflammation: a global metabolomics profiling study » *(Shen et al, 2018)*
  - Echantillons plasmatiques recueillis avant et après le poste chez 52 chaudronniers pratiquant du soudage (33h/mois en moyenne)
  - Mise en évidence de modifications des profils métabolomiques après exposition, visant les **voies du métabolisme lipidique** (glucocorticoïd class, acylcarnitine class et DiHOME species), de **l'utilisation des AA** et le **3-HPMA** (métabolite acroléine)
  - **Voies métaboliques identifiées sont impliquées dans certaines pathologies inflammatoires (PR, LED) et reflètent une inflammation systémique pouvant être liée à l'exposition aux fumées de soudage**



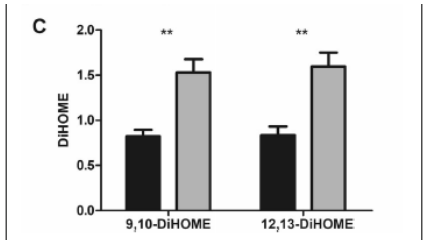


Fig. 2 Pre- and post-welding fume exposure levels of (**a**) the glucocorticoid class of cortisol, cortisone, and corticosterone; (**b**) acylcarnitine species; and (**c**) DiHOME species 9,10-DiHOME and 12,13-DiHOME. Data are expressed as mean ± standard error of mean (SEM). **FDR *q*-value < 0.001

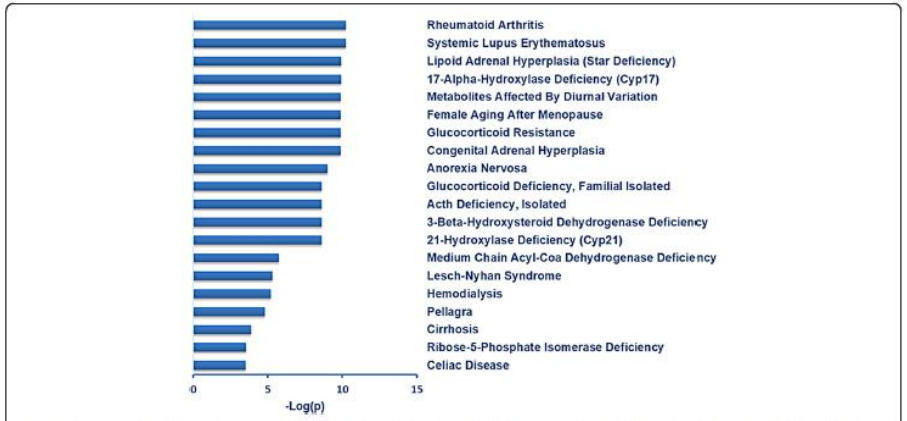
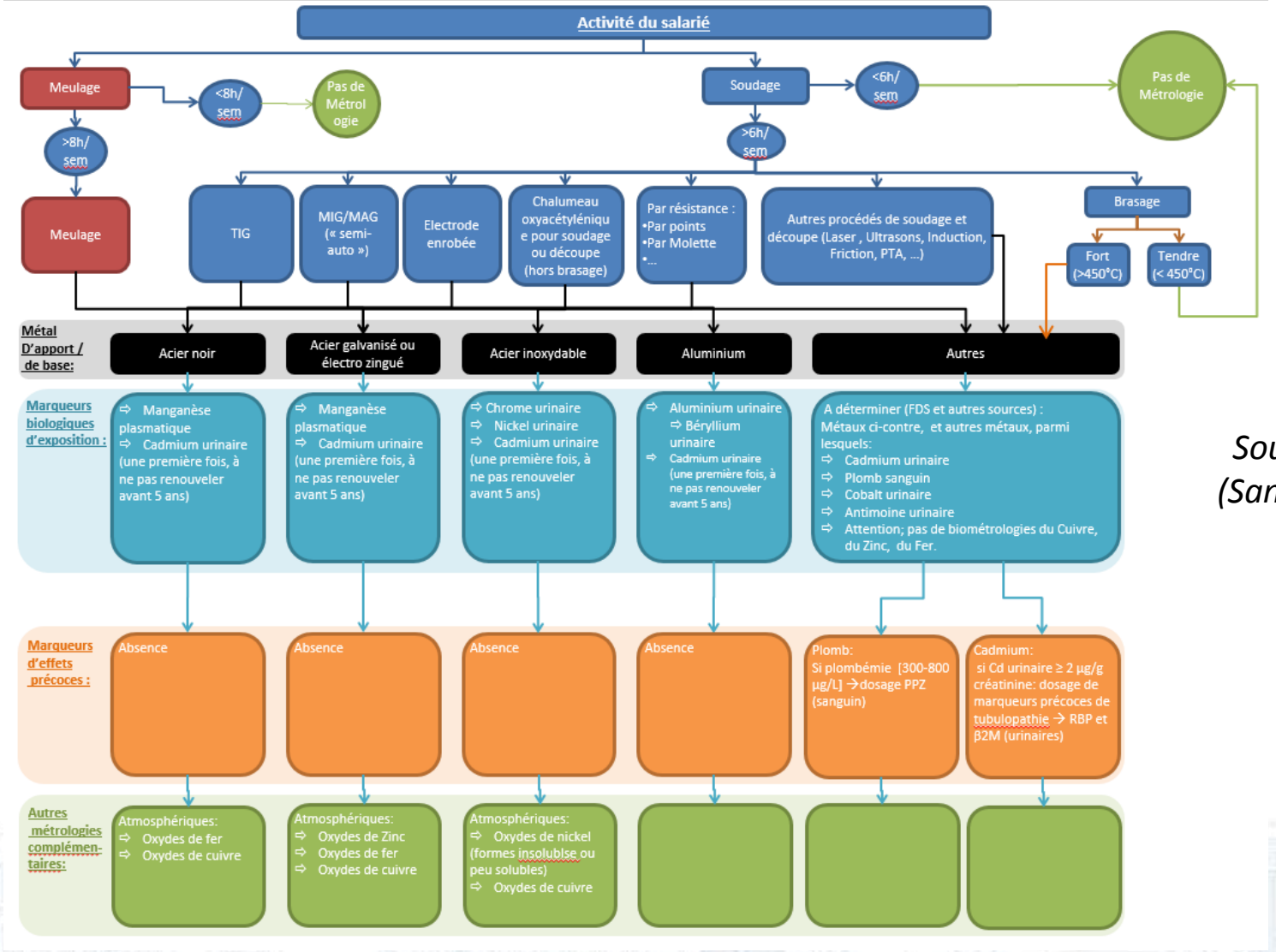


Fig. 4 MetaboAnalyst metabolite set enrichment analysis of disease-associated metabolite sets in blood. Figure shows $-\log_{10}(p)$ values for the top 20 significant pathways

Stratégie SBEP soudeurs 1ere intention pour le MdT



Source: Groupe de travail soudage STDV (Santé au Travail Drôme Vercors) avec leur autorisation

Conclusions (1)

- Utilité de la SBEP pour évaluer l'exposition aux particules (fines) métalliques et oxydes métalliques chez les soudeurs
- Reflet de l'exposition par inhalation et par voie orale (potentiellement importante pour les métaux) sur une période de plusieurs jours / semaines
- Surveillance biologique de 1er niveau (Cr, Ni, Mn) suffisante habituellement pour se faire une idée de l'exposition (+/- Co, Cd… si spécificités) ⇨ recherche d'une sur-imprégnation par rapport à la population générale
- En complément marqueurs inflammatoires (inflammation pulmonaire ou systémique) mais à interpréter prudemment (pathologies, traitements…)
- Précautions à prendre lors du recueil des urines pour éviter une contamination de l'échantillon

Conclusions (2)

- Importance de considérer la solubilité des sels métalliques (oxydes…): ⇨sels solubles éliminés rapidement, concentrations urinaires +++ mais reflètent la fraction non (moins) toxique

⇨sels faiblement solubles s'accumulent au niveau broncho-pulmonaire, élimination lente, concentrations urinaires + mais reflètent la fraction toxique

- Caractère prometteur des biomarqueurs d'effets (profils métabolomiques) mais nécessitent une validation scientifique pour un usage au quotidien par le MdT
- Surveillance atmosphérique complémentaire (nanos, métaux, gaz) et mesures de prévention / protection (ventilation, torches aspirantes, règles d'hygiène, tenue de travail) à recommander

35èmes JOURNÉES NATIONALES DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP

un nouveau souffle dans le BTP

LES PARTICULES FINES

du 22 au 24 MAI 2019

METZ
Centre des Congrès Robert Schuman

Exposition aux fumées de soudage et surveillance biologique

Dr Renaud PERSOONS, Pr Anne MAITRE

Laboratoire de Toxicologie Professionnelle et Environnementale

Equipe de Médecine et Santé au Travail

CHU Grenoble Alpes, Université Grenoble Alpes

Contacts: RPersoons@chu-grenoble.fr

https://biologie.chu-grenoble.fr/toxicologie-professionnelle-et-environnementale

Figure 10. **Opération de soudage à l'arc avec électrodes enrobées**

Figure 12. **Opération de soudage à l'arc sous protection gazeuse**

SIST BTP Service Interentreprises de Santé au Travail Lorraine

GNMST BTP GROUPEMENT NATIONAL MULTIDISCIPLINAIRE DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP