



**UNIVERSITÉ DE LIMOGES COTUTELLE
UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI**

École doctorale N°523 - UMR INSERM 1094 NET
École doctorale des sciences de la santé de Cotonou – URESTE

Thèse

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DES UNIVERSITÉS DE LIMOGES ET D'ABOMEY-CALAVI

Discipline / Spécialité : Santé Publique / Hygiène et santé au travail

Présentée et soutenue par

Brice Hervé YEDOMON

Le 20 décembre 2016

**Travail informel au Bénin : expositions professionnelles et
conséquences sanitaires chez les forgerons-ferblantiers à Cotonou**

JURY :

Président

Pr D. HOUINATO

Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Rapporteurs

Pr. A. MAITRE

Université de Grenoble, France

Pr. EE. CREPPY

Université de Bordeaux, France

Co-Directeurs

Pr B. FAYOMI

Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Pr M. DRUET-CABANAC

Université de Limoges, France

Pr C. MÆSCH

Université de Limoges, France

Dédicace

Je rends grâce à DIEU !

IN MEMORIAM

Je dédie ce travail de recherche à mon cher et regretté Papa, qui n'a cessé de m'encourager et de me guider tout au long de mes études et au début de ce travail de thèse.

MERCI

A Mireille, Franck et Maman

*Kofi Annan, Secretary-General of the United Nations:
"Safe Work is not only sound economic policy, it is a basic human right..."*

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués grâce au soutien de l'Unité de recherche UMR1094 (Neuroépidémiologie Tropicale) de l'Université de Limoges en France, et celui de la Faculté des Sciences de la Santé de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin.

Je tiens en tout premier lieu à exprimer ma plus vive reconnaissance à mes Directeurs de thèse, Messieurs les Professeurs Michel Druet-Cabanac & Christian Mœsch de l'Université de Limoges en France et Monsieur le Professeur Benjamin Fayomi de l'Université d'Abomey Calavi au Bénin.

✓ Professeur **Michel Druet-Cabanac**

Vous avez été un acteur très important au début et à la fin de cette thèse à travers votre pragmatisme et votre sens du travail bien fait. Merci pour toutes les heures supplémentaires que vous m'avez accordées dans votre bureau, même à des heures tardives après vos cours. Malgré toutes vos occupations en tant que chef du Service de médecine et santé au travail à Limoges, vous avez réussi à me faire de la place dans votre emploi du temps chargé. Soyez en remercié.

✓ Professeur **Christian Mœsch,**

Vous êtes un modèle de discipline et de rigueur scientifique. Au près de vous et au sein du laboratoire de toxicologie (CHU de Limoges), j'ai beaucoup appris. Vous avez joué un rôle très important pour garantir la qualité des travaux de recherche contenus dans cette thèse. Je voudrais vous remercier pour votre dévouement et vous souhaiter beaucoup de jours heureux pendant votre retraite universitaire. Sincères remerciements.

✓ Professeur **Benjamin Fayomi,**

Vous avez été pour nous durant cette thèse, un père de famille et un maître avisé des réalités du terrain d'enquête. Votre position de Doyen de la faculté de médecine et de pharmacie de Cotonou ne vous a pas empêché de nous ouvrir les portes de votre bureau, à chaque fois que le besoin s'est fait sentir. Recevez avec ce travail, le témoignage de notre très vive reconnaissance et de nos vœux les meilleurs pour votre retraite universitaire.

Je remercie les membres du Jury pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse :

- Mme le professeur **Anne Maitre**, Professeur de Médecine et Santé au Travail à la Faculté de Médecine de l'Université de Grenoble (France)

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous faites en acceptant d'être parmi les membres de notre Jury de Thèse et d'être rapporteur de ce travail. Vos enseignements à l'Université de Grenoble m'ont été d'une très grande utilité dans la rédaction de cette thèse. Sincères remerciements.

- M. le Professeur **Edmond Ekué Creppy**, Professeur de Toxicologie à la Faculté de Pharmacie de Bordeaux (France)

Nous vous remercions très sincèrement pour avoir accepté d'être rapporteur au sein de notre Jury de thèse. Vos nombreux travaux en toxicologie en général et surtout en milieu tropical font de vous une référence pour l'évaluation de ce travail. Vous avez été un expert scientifique lors de la soumission du projet au comité d'éthique du Bénin. Nous vous remercions pour vos conseils et recommandations avisées.

- M. le Professeur **Dismand Houinato**, Professeur de Neurologie, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Nous vous remercions très sincèrement pour avoir accepté d'être Président de notre Jury de thèse, malgré vos nombreuses occupations. Veuillez trouver ici, cher maître, le témoignage de notre admiration et de notre profonde reconnaissance.

Je remercie tout particulièrement Monsieur le **Professeur Pierre Marie Preux**, Directeur de l'unité de recherche, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe à Limoges, pour sa disponibilité et son écoute attentive.

Je remercie également le Professeur Anani Ludovic et le Docteur Badirou Aguemon, responsables respectivement du Centre National de Transfusion Sanguine et de la Polyclinique ERASME au Bénin, pour m'avoir assisté et surtout pour avoir facilité la réalisation de mes travaux sur le terrain à Cotonou.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Monsieur Alain Menudier, à Florence Lecavelier Des Etangs, à Katia Dugleux et à toute l'équipe LEMACEN (Laboratoire d'Epidémiologie des Maladies Chroniques et Neurologiques de Cotonou).

Je ne saurais oublier :

- Afokpa Kwamivi Félix, doctorant à la faculté de médecine de Cotonou ;
- Les membres et collègues de l'UMR INSERM 1094 Neuroépidémiologie Tropicale (NET, Limoges, France) en particulier : Benoit Marin, Farid Boumédiène, Corine, Carmelle, Harielle, Patcharie, Mandy, Gilles, Jeremy, qui par leurs aides ont su créer une ambiance de travail agréable ;
- Ida ma conseillère, pour l'emploi du temps et les encouragements ;
- Mes compatriotes Béninois de Limoges et la famille Ayivi, qui m'ont toujours prodigué affection et encouragements.

Abréviations

ADN (Acide désoxyribonucléique)

ANAM (Agence Nationale d'Assurance Maladie)

ALA-D (Aminolévulinate déhydratase)

BAR (Biologische Arbeitsstoff-Referenzwerte)

BIT (Bureau International du Travail)

CIST (Conférence Internationale des Statisticiens du Travail)

CNSS (Caisse Nationale de Sécurité Sociale)

CCIB (Chambre de Commerce et d'Industrie du Bénin)

DJA (Dose journalière admissible)

DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)

ENNS (Enquête Nationale Nutrition Santé)

ETM (Éléments Traces Métalliques)

ECMS (Enquête Canadienne sur les Mesures de Santé)

FNRB (Fonds National de Retraite du Bénin)

GerES (German Environmental Survey)

GEH (Groupes d'Exposition Homogène)

HBM (Human Biomonitoring)

INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques)

IBE (Indicateur Biologique d'Exposition)

ICP- AES ((Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry)

ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)

INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité)

IPEC (Programme international pour l'élimination du travail des enfants)

MMT (Méthyl cyclopentadiényl Manganese Tricarbonyl)

MSSB (Mutuelle de sécurité sociale)

NAA (Analyse par Activation Neutronique)

NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey program)

OIT (Organisation Internationale du Travail)
OMC (Organisation Mondiale du Commerce)
OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique)
ODD (Objectifs pour le Développement Durable)
OSHA (Occupational Safety & Health Administration)
OMS (Organisation Mondiale de la Santé)
PFTE (Pires Formes de Travail des Enfants)
PNUD (Programme des Nations Unis pour le Développement)
PISSC (Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques)
PIB (Produit Intérieur Brut)
PPZ (Proto Porphyrine Zinc sanguine)
PVC (Polychlorure de vinyle)
STEP (Stratégies et Techniques contre l'Exclusion sociale et la Pauvreté)
OES (Optical Emission Spectrometry)
SAA (Spectrométrie d'absorption atomique)
TLV (Threshold Limit Value)
VLCT (Valeur Limite d'exposition à Court Terme)

Abréviations :

cf. : se référer à

s.d. : sans date

Unités :

ng/m³: nanogrammes/ mètre cube

µg/L : microgrammes /litre

Sommaire

Introduction	1
I. PREMIERE PARTIE : État de la question.....	3
I.1. Secteur informel et économie informelle	3
I.2. Éléments traces métalliques en population humaine.....	30
II. DEUXIEME PARTIE : Travaux de recherche.....	85
II.1. Objectifs.....	85
II.2. Site de l'étude	86
II.3. Article N° 1 : Risques professionnels, conditions de travail et état de santé des ferblantiers travaillant dans l'économie informelle à Cotonou, Bénin.....	89
II.4. Article N°2 : Évaluation des concentrations sanguines en éléments métalliques en population générale	105
II.5. Article N° 3 : Évaluation de 20 métaux toxiques et essentiels dans le sang des ferblantiers informels, recycleurs de métaux à Cotonou (Bénin).....	116
III. Discussion générale	136
Conclusion	142
Références bibliographiques	143
Annexes	151

Introduction

La promotion d'un travail décent pour tous les hommes et femmes dans le monde représente un objectif stratégique de l'OIT (Organisation Internationale du Travail) et un instrument d'amélioration de la productivité et du développement économique et social. En effet, la sécurité du marché du travail, la sécurité de l'emploi, la sécurité professionnelle, la sécurité au travail, la sécurité du maintien des qualifications, la sécurité du revenu et la sécurité de représentation, sont les sept sécurités essentielles afin de garantir la protection de tous les travailleurs (Conférence internationale du travail, 2002).

Le concept de « l'Economie informelle » a été majoritairement documenté par rapport à son rôle dans le développement, à sa contribution à la croissance et à la répartition des revenus. Toutefois, les acteurs de l'économie informelle, mal connus et bien souvent oubliés des politiques nationales échappent aux services officiels de sécurité de santé ou d'inspection au travail. Cependant, avec la convention sur le cadre promotionnel pour la sécurité et la santé au travail en 2005, une avancée majeure est faite dans le souci de l'amélioration des conditions de travail. Ainsi la protection de tous les travailleurs, en particulier les plus vulnérables, tels que ceux de l'économie informelle doit être un objectif pour le système national, qui est chargé de prendre des dispositions afin d'assurer la prévention des dommages, des maladies professionnelles et des décès imputables au travail (Conférence internationale du travail, 2005). Pour atteindre cet objectif une recommandation a été adressée par le BIT (Bureau International du Travail) aux différents États membres dont le Bénin (Organisation Internationale du Travail and Organisation Mondiale du Commerce, 2009).

Au Bénin, selon le rapport de l'INSAE (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Économique), le « secteur informel » représente près de 80% des travailleurs, suivi par le secteur privé moderne (11%) et la fonction publique (9%) (Igue, 2008). Malgré leur importance économique et sociale, la majorité des travailleurs du secteur informel, sont dépourvus de systèmes de sécurité sociale ou d'assurance santé. Cette situation combinée d'une part à la précarité des conditions de travail et d'autre part à la faiblesse des revenus enregistrés par ces derniers, les rend particulièrement vulnérables face aux risques sanitaires (Bureau international du travail, 2002). A tout ceci, s'ajoute le fait que dans l'artisanat, très développé au Bénin, les maitres artisans utilisent bien souvent de jeunes apprentis, qui sont alors exposés, très jeunes, à des risques pouvant être nuisibles pour leur santé et leur développement. La situation socio sanitaire des apprentis en milieu artisanal à Cotonou a montré que 58,3% des chefs d'ateliers enquêtés ne disposaient pas d'équipements, de protection individuelle, recommandés, ni pour eux même, ni pour les apprentis et s'exposent ainsi à des nuisances physiques et chimiques de toutes sortes (Ayelo et al., 2010).

Chez les forgerons-ferblantiers, l'absence d'utilisation d'équipements de protection serait à l'origine d'une exposition à des émanations toxiques telles que des fumées aux compositions complexes, mélangées à des particules de métaux (Tossou, 2001). Cette situation alarmante mérite des investigations sur plusieurs plans (risques physiques et chimiques).

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'étudier l'impact des conditions de travail sur la santé des forgerons-ferblantiers exerçant dans le cadre de l'économie informelle, à Cotonou au Bénin. L'évaluation des conditions de travail des ferblantiers et la description de l'état de santé des maîtres artisans ferblantiers et de leurs apprentis sera un des objectifs spécifiques de ce travail de recherche. Les objectifs spécifiques seront également d'évaluer par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS), les concentrations sanguines des éléments traces métalliques (ETM) chez les ferblantiers, d'où la nécessité de connaître les valeurs usuelles d'une vingtaine d'éléments métalliques dans le sang total en population masculine non exposée professionnellement à Cotonou. Cette étude rentre dans le champ d'action de l'Unité d'enseignement et de recherche en santé au travail et environnement (URESTE) du Bénin qui a déjà dirigé de nombreux travaux sur la santé des artisans de l'économie informelle au Bénin. Il s'agit d'une étude menée en collaboration avec l'équipe de recherche en neuroépidémiologie tropicale à l'Université de Limoges (UMR-S 1094 NET-INSERM).

Dans la première partie de ce travail, nous nous consacrerons à une revue de la littérature sur les caractéristiques et enjeux sanitaires de l'économie informelle dans les pays développés et en voie de développement (plus particulièrement au Bénin). Nous présenterons également, l'intérêt de la surveillance biologique des éléments traces métalliques en population générale et en milieu professionnel. Dans la deuxième partie, nous présenterons nos travaux de recherche en décrivant les conditions de travail et l'état de santé général des ferblantiers. Ensuite nous évaluerons les profils métalliques retrouvés chez les forgerons-ferblantiers en comparaison avec la population générale.

Dans les perspectives, nous apporterons des approches de solutions visant l'amélioration des conditions de travail pour la prévention des intoxications aux métaux toxiques. Nous proposerons également une stratégie pour une meilleure prise en charge de la sécurité et de la santé au travail dans l'économie informelle (plus particulièrement chez les forgerons-ferblantiers) en République du Bénin.

I. PREMIERE PARTIE : État de la question

I.1. Secteur informel et économie informelle

I.1.1. Définition et caractéristiques du secteur informel

Au début des années 1970, un nouveau concept, « le secteur informel » est né, décrivant un ensemble d'activités professionnelles qui se déroulaient, par nécessité de survie, en marge des pouvoirs publics. Ce concept « secteur informel » est décrit pour la première fois en 1971 au cours d'une étude menée sur les activités économiques en milieu urbain au Ghana. Hart, socio-anthropologue, est le premier à faire usage du terme « secteur informel », dans le cadre d'une étude sur le tiers monde où il décrivait une part de la population active travaillant en dehors du secteur formel. Ce secteur était considéré par Hart comme synonyme d'auto emploi individuel constituant ainsi une alternative au chômage et aux activités formelles. Cette notion théorique ne permettait pas de prendre en considération un certain nombre d'activités (Hart, 1973). C'est à la suite d'un rapport sur la situation de l'emploi urbain à Nairobi (Kenya) que le Bureau international du travail (BIT) propose pour la première fois une définition du secteur informel, secteur qui fera l'objet de nombreux travaux de recherche (Muir, 1974). Ce concept a également été considéré comme une activité délibérée qui se déroulait en dehors des voies formelles ou comme un moyen d'augmenter ses revenus (Safier, 1981).

Autrefois considéré comme secteur résiduel de subsistance aux familles, le secteur informel s'est très vite développé et s'est imposé grâce à la multitude d'opportunités d'emplois et à la redistribution des revenus dont il est à l'origine. L'évaluation de l'impact du secteur informel sur l'activité économique interne des pays a nécessité l'adoption d'une définition internationale. De ce fait, le secteur informel a été différencié de son image d'illégalité pour une distinction claire entre illégal, souterrain et informel. Toutefois, il peut y avoir des chevauchements entre ces expressions car certaines entreprises du secteur informel peuvent choisir de façon délibérée de ne pas être enregistrées pour éviter des coûts supplémentaires aux coûts de la production (Organisation de Coopération et de Développement Économiques, 2003). La 15^{ème} Conférence internationale des statisticiens du travail (CIST), en 1993, a permis l'adoption d'une définition internationale du secteur informel, en se basant sur les caractéristiques des « unités de production » (entreprises) dans lesquelles se déroulent ces activités, plutôt que selon les caractéristiques des personnes concernées ou leur travail. Les critères pris en compte dans la définition concernent : l'organisation légale des entreprises, la propriété et le type de comptabilité, le critère de destination des produits. Seuls les critères de non enregistrement, de la non tenue de comptabilité et de la production marchande sont retenus pour les comparaisons internationales (Afristat, 2010). Les critères de définition sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1: Critères de définition des entreprises du secteur informel (Afristat, 2010)

Critères	Objectifs
1. Organisation juridique : entreprise non constituée comme entité légale séparée des propriétaires	Identification des entreprises non constituées en sociétés
2. Propriété : entreprise créée et gérée par des membres de ménages	Identification des entreprises familiales ou individuelles non constituées en société
3. Type de comptabilité : pas de dispositif comptable complet comprenant des bilans comptables	Exclusion des quasi-sociétés des entreprises familiales non constituées en société
4. Destination de la production : au moins certains des produits marchands	Identification des entreprises familiales ou individuelles non constituées en société produisant des biens et services marchands - Exclusion des entreprises familiales ou individuelles non constituées en société produisant des biens exclusivement pour l'utilisation propre du ménage
5. Type d'activité économique	Exclusion des ménages employant du personnel domestique rémunéré - Exclusion possible des entreprises engagées dans l'agriculture et des activités connexes
6.1 Effectif des personnes engagées / employées / employées permanentes inférieur à un nombre n et/ou 6.2 Non enregistrement de l'entreprise et/ou non enregistrement des employés de l'entreprise	Identification des entreprises du secteur informel comme un sous-groupe d'entreprises familiales ou individuelles non constituée en société produisant des biens et services marchands

Pour l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), le secteur informel se définit d'une façon générale comme un ensemble d'unités produisant des biens et des services en vue principalement de créer des emplois et des revenus pour les personnes concernées. Ces unités, ayant généralement un faible niveau d'organisation, opèrent à petite échelle et de manière spécifique, avec peu ou pas de division entre le travail et le capital en tant que facteurs de production (Organisation de Coopération et de Développement Économiques, 2003). L'approche binaire et antinomique (formel / informel) est largement réfutée du fait du chevauchement, de l'imbrication voire l'interdépendance et la complémentarité entre les deux pans économiques.

Pour la CIST, une définition statistique de l'emploi informel a été élaborée. Elle englobe les types d'emplois : les travailleurs à leur compte qui possèdent leurs propres entreprises du secteur informel ; les employeurs qui possèdent leurs propres entreprises du secteur informel; les travailleurs familiaux non rémunérés, qu'ils travaillent dans des entreprises du secteur formel ou du secteur informel ; les membres de coopératives de producteurs informelles ; les salariés qui occupent un emploi informel qu'ils soient employés par des entreprises du secteur formel, par des entreprises du secteur informel ou par des ménages comme travailleurs domestiques rémunérés ; les personnes qui travaillent d'une manière indépendante à la

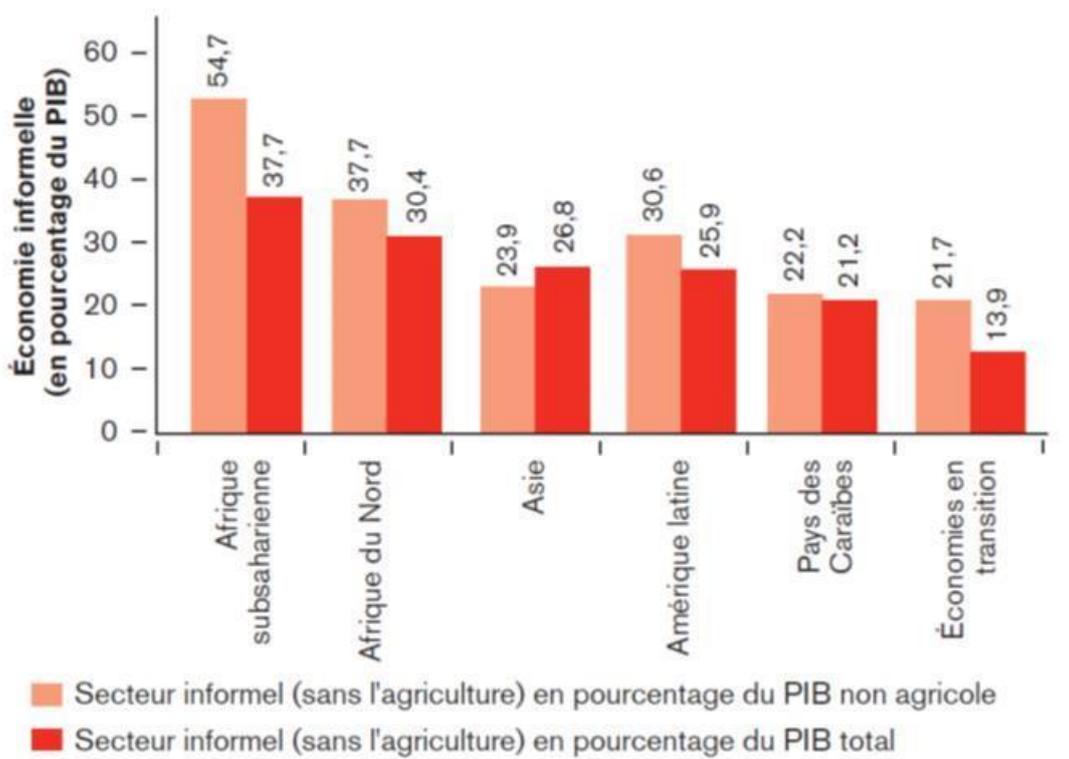
production de biens destinés à l'usage final exclusif de leur ménage (Conférence internationale des statisticiens du travail, 1993).

Il n'est donc pas aisé de parler d'un secteur informel. La diversité des emplois concernés, la grande variabilité des acteurs et l'extension continue à toutes les branches d'activité de la société a fait évoluer la désignation de ce concept vers l'expression « Économie informelle ». Contrairement au concept de secteur informel, l'économie informelle tient compte d'une diversité considérable d'activités économiques de travailleurs et d'unités économiques qui ne sont pas couverts, en vertu de la législation ou de la pratique, par des dispositions formelles. Les caractéristiques de l'économie informelle restent toutefois difficiles à cerner d'une façon unique tant celle-ci est banalisée, tolérée ou condamnée en fonction du contexte culturel et juridique, du contrôle fiscal en vigueur et des instances de surveillance mises en place par les autorités des différents pays (Charmes, 2005).

I.1.2. Importance et caractéristiques de l'économie informelle

Dans le rapport rédigé par Daza pour le BIT, la conception de l'économie informelle peut être différente. Deux visions s'opposent à savoir que les personnes vivant dans les pays en développement considèrent qu'il s'agit d'une question de subsistance alors que ceux vivant dans les pays développés considèrent qu'il s'agit d'atteindre un niveau de rentabilité ou de bénéfices en contournant la fiscalité ou autres contraintes administratives (Daza, 2005). Selon le BIT, plus de 90 % de la population active serait employée dans l'économie informelle en Afrique subsaharienne. En Asie, malgré une croissance rapide, les travailleurs pauvres représenteraient entre 47 et 84 % de la main-d'œuvre. En Amérique latine, l'économie informelle accueillerait 75 % des travailleurs et représenterait 40 % du PIB (International Labour Office, 2007). L'estimation de la place du secteur informel dans le monde par rapport au PIB total ou PIN non agricole est présentée figure 1.

Figure 1 : Place du secteur informel dans le monde (Bacchetta et al., 2009)



Le développement de l'informel présente tout de même une caractéristique constante dans les pays développés et en développement, qui est la recherche d'une solution efficace en réponse à une pénurie d'emploi ou à un défaut de qualifications suffisantes (Crevoisier et al., 2007).

L'économie informelle représente entre un quart et un tiers du PIB dans les pays d'Asie ou d'Amérique latine. Dans ces 2 continents, l'informalité est principalement définie comme l'absence de protection sociale chez les travailleurs par rapport au critère relatif à l'absence de contrat de travail. L'emploi informel n'est pas spécifique au « secteur informel » ou entreprises informelles mais peut se retrouver également dans des entreprises formelles comportant des travailleurs non déclarés (Charmes, 2012).

I.1.2.1. Dans les pays développés

La définition de l'économie informelle dans les pays les plus avancés et les pays émergents se rapporte souvent à l'économie de l'ombre ou « shadow economy ». L'économie informelle est définie par Bureau et Fendt comme l'ensemble des activités productives avec un fort dynamisme entrepreneurial qui sont considérées comme déviantes au regard des règles légales d'une part, et des règles de marché d'autre part (Bureau et Fendt, 2011).

Afin d'éviter les confusions en ce qui concerne le caractère légal ou illégal des activités informelles, la commission Européenne a proposé de simplifier cette notion comme

désignant les activités marchandes qui ne sont pas déclarées auprès des pouvoirs publics dans le but principal d'échapper à l'impôt mais qui restent légales en dehors de cette dimension fiscale. Le plus souvent, ces activités de l'économie informelle dans les pays développés, sont réduites à des activités exercées par des personnes et non pas par des organisations.

La définition de l'économie informelle dans les pays développés désigne plus particulièrement toutes les activités économiques légales et les revenus dérivant de ces dernières, qui sont délibérément cachés à l'autorité publique pour l'une des raisons suivantes (Gërkhani, 2004) :

- Eviter le paiement de taxes ou revenus sur la valeur ajoutée,
- Eviter le paiement des cotisations de sécurité sociale,
- Eviter d'avoir à répondre à certaines normes du marché du travail juridique, comme le salaire minimum, nombre maximal d'heures de travail, les normes de sécurité, etc.,
- Eviter de se conformer à certaines procédures administratives, telles que les réponses à des questionnaires statistiques ou autres contraintes administratives.

Cette économie informelle s'est adaptée aux différentes législations contraignantes. Les termes de « travail illégal, travail occulte, emploi caché, travail au noir, travail non déclaré, travailleurs clandestins, entreprises souterraines, ... » dont l'usage est relativement répandu dans les pays développés, ne sont pas toujours interchangeables avec la notion d'informalité. Leur utilisation dépend dans une large mesure de leur signification propre dans chaque langue et de leur éventuel contenu juridique (Daza, 2005). Toute activité informelle dissimulée aux pouvoirs publics n'est pas nécessairement synonyme d'illégalité quoique certaines activités s'exerçant en dehors du cadre réglementaire soient, en termes juridiques, communément qualifiées d'informelles et considérées comme illégales. Les acteurs de l'économie informelle licite sont le plus souvent des retraités, des étudiants, des femmes mariées à la recherche d'un complément de revenu et bien souvent des immigrés en attente d'une insertion sociale. Les activités le plus souvent effectuées tournent autour du travail à domicile, du travail dans les ateliers clandestins et celui effectué par les travailleurs autonomes ou occasionnels et les immigrés en situation irrégulière. En France, comme dans la plupart des pays développés, le travail au noir est interdit par la loi et le travailleur est légalement autant en infraction que l'employeur.

Suite à la crise économique, qui a frappé le monde occidental dans les années 80, et à l'introduction des politiques d'ajustement structurel conduisant aux licenciements de nombreux salariés dans le secteur public, l'économie informelle s'est accrue dans les pays développés.

La modernisation n'a pas suffi à faire régresser l'économie informelle dans les sociétés développées comme le pensaient les économistes et les chercheurs.

I.1.2.2. Dans les pays en développement

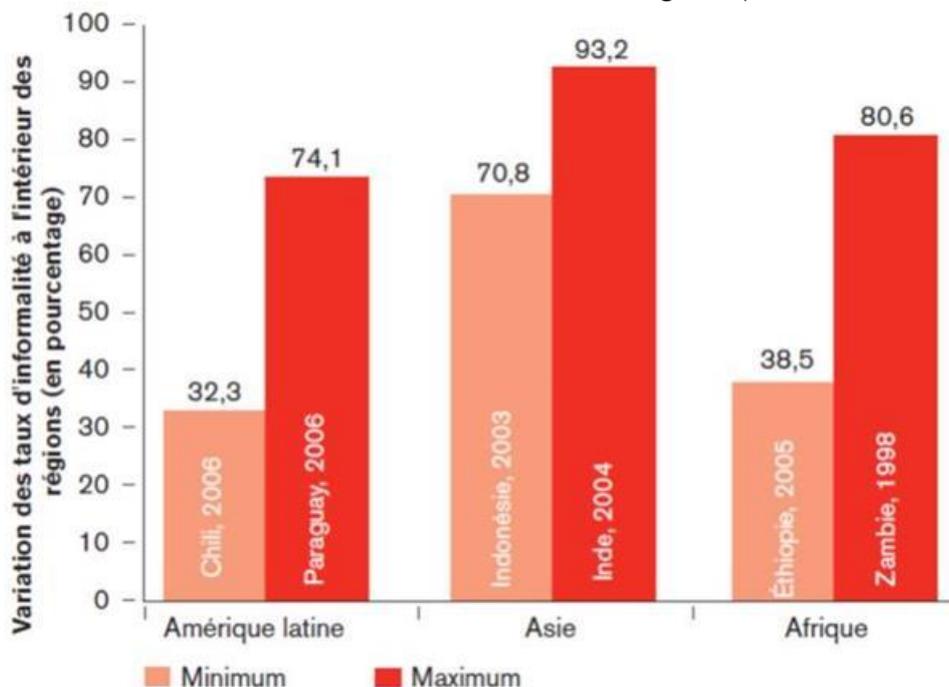
Bien que présents dans les pays développés de l'OCDE, c'est dans les pays en développement que l'emploi informel est répandu et problématique du fait d'un lien fort avec la pauvreté des populations et du manque à gagner pour la fiscalité des pays. L'emploi informel est bien souvent le recours des plus pauvres afin de subvenir à leur besoin. Cette situation à des conséquences sur leur revenu, fragilise leur droits fondamentaux et nuit à leur défense (OCDE, 2009).

S'appuyant sur une définition large englobant différents types « d'informalité », il existe une forte disparité des taux d'informalité selon les pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine. Ces taux varient fortement d'un pays à l'autre et sont très persistants dans le temps. Ils peuvent être de l'ordre de 90 % dans certains pays et de 30 % à peine dans d'autres. Les variations des taux d'informalité à l'intérieur des régions (par rapport à l'emploi total, en %) sont présentées, figure 2 (Bacchetta et al., 2009).

En Afrique, le « secteur informel » représente 61 % de la main-d'œuvre urbaine. Il est probablement à l'origine de plus de 93 % des nouveaux emplois créés au cours des années 90 (Bacchetta et al., 2009). Présenté dans un premier temps comme un secteur parallèle au secteur formel et caractérisé par des niveaux de rémunérations faibles, le concept a très vite évolué pour prendre en considération les contributions non négligeables de ce secteur à l'économie formelle. Dans certaines régions, notamment en Afrique subsaharienne et en Asie, plus de 80 % des emplois non agricoles sont informels (OCDE, 2009).

Le « secteur informel » ne devrait pas être considéré comme un problème car il constitue non seulement une source de revenus afin de sortir les populations de l'extrême pauvreté, mais également il est la réponse face à l'incapacité des politiques à garantir des droits à leurs populations (Kanté, 2002). L'importance de l'économie informelle est telle que même les entreprises formelles entretiennent des liens forts avec l'informel en ne déclarant pas certaines activités ou certains employés. La plupart des entreprises formelles s'engagent souvent dans des pratiques informelles ce qui fait que l'informel est devenu plus une question de degré que de statut (Benjamin et Mbaye, 2012). Cette situation conduit à affirmer que c'est l'économie formelle, qui est en quelque sorte l'exception. Malgré les différentes tentatives de formalisation des activités informelles par les organismes internationaux, l'économie informelle est de plus en plus considérée comme une forme d'alternative aux institutions officielles, qui serait tout simplement insuffisamment institutionnalisée.

Figure 2 : Variation des taux d'informalité à l'intérieur des régions (Bacchetta et al., 2009)



Dire de l'économie informelle qu'il s'agit d'une « situation normale conforme », c'est donc affirmer sa dimension institutionnelle et inviter à la considérer dans les catégories de l'institutionnalisation (Pesqueux, 2014). Considérant l'aptitude de l'économie informelle à procurer des biens et des services, à la portée de la majorité des consommateurs, la protection des emplois et l'accès à un travail décent constituent un enjeu majeur. En Afrique subsaharienne, la volonté primaire de freiner l'expansion de l'économie informelle a fait place à une certaine tolérance, voire à une volonté de l'appuyer afin de faire reculer la pauvreté par l'amélioration des revenus et de la productivité (Kanté, 2002).

Les causes de l'informalité dans les pays en développement sont diverses mais tournent généralement autour des facteurs clés suivants (Kanté, 2002) :

- Les faibles taux de croissance économique, les politiques d'ajustement structurelles et l'exode rural vers les villes capitales ont contribué à une croissance rapide de la population active urbaine se contentant d'activités à faible revenu, générées dans l'économie informelle,
- La mondialisation et le développement des importations provenant des pays industrialisés concurrencent les productions industrielles locales créant ainsi une diminution des emplois dans le secteur privé,
- Le manque d'investissement dans les infrastructures de base (routes, transports, installations de stockage et systèmes d'irrigation durables) fait que la production

agricole plus particulièrement dans les pays du Sud du Sahara est essentiellement informelle,

- Le faible niveau de scolarisation des femmes, dans certains pays, contraint ces dernières à n'avoir recours qu'à l'économie informelle pour générer des revenus,
- Le manque d'incitation à formaliser, la lourdeur administrative et le peu d'avantages tirés de la formalisation d'une petite et moyenne entreprise constituent un frein au processus,
- L'instabilité sociale, l'insécurité, les guerres sont autant de facteurs responsables du phénomène d'immigration dans un certain nombre de pays, créant ainsi une main d'œuvre recherchant du travail même informel et peu rémunéré afin de survivre.

I.1.3. Travail décent et sécurité sociale dans l'économie informelle : enjeux sanitaires pour les pays en développement

Le fardeau économique des mauvaises pratiques de sécurité et santé au travail dans les pays en développement représente, tous les ans, 4 % du produit intérieur brut. Les conditions de sécurité et de santé au travail varient très sensiblement selon les pays, les branches d'activité et les groupes sociaux. Le nombre de décès et de lésions est particulièrement élevé dans les pays en développement où une grande partie de la population travaille dans des secteurs dangereux tels que l'agriculture, la pêche ou l'exploitation minière. Ce sont les plus démunis et les moins protégés (en général les femmes, les enfants et les migrants) qui sont les plus touchés dans le monde. Pour agir sur la sécurité et la santé au travail, le BIT se concentre sur 2 grands objectifs (Bureau international du travail, 2000) :

- Promouvoir le travail décent et améliorer les conditions de travail.
- Etendre la sécurité sociale aux travailleurs informels.

I.1.3.1. Promotion du travail décent dans l'économie informelle

La précarité des emplois, le chômage, le travail informel, le travail des enfants et le travail forcé sont autant de formes de travail reconnues comme ayant un impact sur la santé des populations (Benach et al., 2010; Muntaner et al., 2010; García-Ubaque et al., 2012). Toutes ces formes de travail sont présentes dans le marché du travail et interagissent entre elles. L'emploi informel est considéré comme un déterminant socio-économique important car il représente plus de la moitié des emplois non agricoles (Chen, 2016). Si il a été souvent étudié d'un point de vue économique et socio-politique, l'impact du travail informel sur la santé des populations dans les pays à faibles revenus a fait l'objet de très peu d'études (Kromhout, 1999). Cette constatation résulte du faible niveau de développement des services de santé en général, et en particulier, ceux spécialisés en santé au travail et dans le dépistage des maladies professionnelles (Loewenson, 1998). L'environnement et les conditions de travail

précaires sont les principaux facteurs à l'origine de l'altération de la santé et de la diminution du bien-être général des travailleurs informels. Cette précarité est accentuée par la carence de services de santé au travail (Theuri, 2012). L'insuffisance des données de santé au travail dans le secteur informel et les longs délais de survenue des maladies en relation avec les expositions professionnelles ne permettent pas d'évaluer l'impact sanitaire des conditions de travail.

Les relations avec l'employeur, les conditions d'emploi et les conditions de travail ont un impact sur la santé des travailleurs (Benach et al., 2007).

- **Relations avec l'employeur**

Les relations de pouvoir et la protection sociale de l'employeur à l'employé sont des points essentiels pour garantir aux travailleurs un travail décent. Dans l'économie informelle, lorsque ces relations existent, elles sont surtout fondées sur l'emploi occasionnel, les relations de parenté ou relations personnelles. L'absence de contrat de travail et l'utilisation d'accords verbaux pour des travaux peu ou pas rémunérés constituent un terreau propice à l'installation de la précarité financière et de la vulnérabilité sanitaire des acteurs (apprentis et ouvriers...) exerçant sous tutelle.

- **Les conditions d'emploi**

Dans les pays en développement, le marché du travail est bien souvent caractérisé par un niveau élevé de chômage, le sous-emploi, la pauvreté, l'analphabétisme, la malnutrition, une main-d'œuvre non qualifiée et des salaires très bas pour les femmes et les enfants travaillant dans le secteur informel. Ces différentes situations amènent les populations à accepter des activités peu rémunérées et non protégées socialement (absence d'avantages sociaux tels que la retraite, les congés maladie, l'assurance maladie, ...) entretenant ainsi le cercle vicieux de la pauvreté et de la vulnérabilité. Les maladies, les problèmes de santé, les conditions de travail non sécurisées et la perte potentielle de revenus constituent le quotidien de nombreux travailleurs informels (Moure-Eraso et al., 2006).

- **Les conditions de travail**

Le travail décent résume les aspirations des êtres humains au travail. Il regroupe l'accès à un travail productif et convenablement rémunéré ; la sécurité sur le lieu de travail et la protection sociale pour les familles ; de meilleures perspectives de développement personnel et d'insertion sociale ; la liberté pour les individus d'exprimer leurs revendications, de s'organiser et de participer aux décisions qui affectent leur vie ; et l'égalité des chances et de traitement pour tous, hommes et femmes. En septembre 2015, le travail décent est devenu un élément central du « Programme de développement durable pour 2030 » (ONU, 2015).

Selon le Directeur général du BIT dans le rapport de la 90^{ème} session de la Conférence internationale du Travail en 2002, « c'est justement dans le secteur informel, parmi les plus pauvres, que les besoins sont les plus grands. Si nous prétendons à l'universalité, (que) tous ceux qui travaillent ont des droits au travail – il nous faut nous attaquer à ces problèmes ». Dans ce rapport, les quatre piliers du travail décent sont décrits (Conférence internationale du travail, 2002) (voir encadré 1).

L'exécution du travail dans des conditions d'hygiène défavorables associées à l'absence d'équipement de protection ou d'outils de travail adaptés ainsi que des rythmes de travail soutenus auront des conséquences négatives sur la santé de ces travailleurs. La santé et la sécurité au travail sont un enjeu majeur de santé publique. Le lien avec le travail, pour de nombreuses maladies, est fréquemment ignoré du fait de l'absence d'évaluation des expositions et du délai important d'installation des maladies. Pourtant, ces maladies, en lien avec le travail, tuent chaque année 6 fois plus de personnes dans le monde que les accidents du travail (Moure-Eraso et al., 2006).

L'analyse des différents modèles de promotion de la santé au travail montre que l'accent doit être mis soit sur les comportements de santé, soit sur l'environnement de travail, ou d'intégrer ces deux dimensions (Muller and Mairiaux, 2008). Le type d'activité, l'évaluation des risques, la possibilité d'aménagement (lieux et conditions de travail) et la possibilité de formation et d'information sont autant de paramètres à prendre en compte pour améliorer la santé et la sécurité des travailleurs. Les données utilisées en général pour concevoir une stratégie de prévention sont principalement collectées par l'intermédiaire de 3 canaux : les déclarations que les employeurs adressent aux ministères du travail conformément à leurs obligations légales, les demandes d'indemnisation acceptées par les régimes d'assurance contre les accidents du travail, et les informations fournies par les médecins praticiens en santé au travail (International Labour Office, 2013a).

Chez les acteurs de l'économie informelle, l'absence de données statistiques ou de versement de prestations en cas d'accident du travail rend caduque ou inexistante la mise en place d'un système de recueil de données indispensables à la prévention. Ce sont pourtant les travailleurs de l'économie informelle qui constituent la majorité de la main-d'œuvre et qui sont les plus exposés à des niveaux de risques élevés, de par la précarité des outils et la pauvreté des acteurs. Malgré les nombreuses politiques de formalisation des travailleurs de l'économie informelle, l'absence de documentation des risques sanitaires et de politique de prévention amplifie les dangers et compromet silencieusement la santé de nombreuses personnes.

Encadré 1 : Informalité et les quatre piliers du travail décent (90^{ème} session de la Conférence internationale du Travail, 2002)

<p>Dialogue social Organisation, représentation et dialogue sont les processus essentiels pour jouir de différents droits au travail. La liberté d'association et le dialogue social sont les pierres angulaires d'une bonne gouvernance démocratique sur le marché du travail. L'informalité et l'exclusion des processus de dialogue social apparaissent lorsque les acteurs de l'économie informelle sont incapables d'organiser et d'articuler leurs besoins et leurs intérêts; lorsque les organisations constituées de salariés et de travailleurs indépendants ne sont pas reconnues, et pire, lorsqu'elles sont supprimées; lorsque les travailleurs et les pauvres sont exclus des possibilités de participation au profit des intérêts dominants; et lorsque les organisations de travailleurs et d'employeurs ainsi que les formations tripartites excluent certaines catégories de travailleurs et d'entrepreneurs.</p> <p>Droits Tous ceux qui travaillent ont des droits au travail, quel que soit leur emploi. L'OIT demande l'amélioration des conditions de travail, où que ce soit, dans l'économie formelle ou informelle, à domicile, dans la communauté ou dans le secteur bénévole, que les travailleurs soient organisés ou non. L'informalité en terme de droits peut exister parmi les populations qui ne sont pas protégées par le droit et l'administration du travail, qui n'ont pas d'accès aux mécanismes de règlement des litiges, qui ne peuvent pas former d'associations reconnues par la loi, qui n'ont pas accès aux connaissances juridiques et quant à leurs droits et qui travaillent dans des conditions d'esclavage et inéquitable qui échappent à la surveillance de l'État.</p>	<p>L'informalité et les quatre piliers du travail décent (Emploi, protection sociale, dialogue social et droits)</p> <p>Emploi La nécessité d'offrir aux gens davantage de possibilités de trouver un travail productif et de gagner décemment leur vie. En ce qui concerne l'emploi, l'informalité et l'exclusion incluent l'accès non seulement à des emplois de qualité garantissant des revenus décents, mais également à des moyens permettant d'améliorer la capacité des acteurs de l'économie informelle à trouver des opportunités productives (par exemple, la formation professionnelle, les services financiers, des informations sur les marchés) et des politiques qui encouragent les activités économiques des pauvres, utilisent leurs atouts et développent leurs marchés (par exemple, les techniques de production à forte intensité de main-d'œuvre, les infrastructures accessibles à des groupes et des communautés, les politiques commerciales qui n'introduisent pas de discrimination excessive vis-à-vis des produits des pauvres, des services financiers et un espace de marché accessible aux pauvres).</p> <p>Protection (sociale) contre les vulnérabilités La nécessité de s'attaquer aux contingences qui excluent les gens du travail, que ce soit le résultat du chômage, de la perte de sources de revenus, de la maladie ou de la vieillesse. En ce qui concerne la protection sociale, l'informalité apparaît lorsque les systèmes de sécurité sociale sont hors de portée de certains types de travailleurs et d'entrepreneurs, ce qui les met à la merci d'une paupérisation soudaine; et lorsque les services de sécurité au travail et les services consultatifs sanitaires ne dépassent pas le cadre des entreprises formelles.</p>
--	---

I.1.3.2. Protection sociale, santé et sécurité des travailleurs de l'économie informelle

- **Protection sociale des travailleurs informels**

Selon l'OCDE, bien que les travailleurs du secteur informel représentent plus de la moitié de la main d'œuvre dans les pays en développement, il n'en demeure pas moins qu'ils sont mal payés, sans contrat de travail ni prestations sociales. La protection des travailleurs informels constitue un des objectifs de l'OIT, qui propose des mesures efficaces et durables afin de prévenir les accidents au travail, les maladies professionnelles et autres risques environnementaux (Bureau international du travail, 2000). Selon la Convention 102 de l'OIT, qui fixe les normes minimales pour la sécurité sociale, un système global de sécurité sociale doit couvrir des prestations relatives aux maladies, au chômage, à la maternité, aux accidents de travail, à la vieillesse, à l'invalidité et aux allocations familiales (OIT, 1952). En 2011, la Conférence internationale du Travail l'a qualifiée de point de repère et de référence pour le développement progressif d'une couverture complète de sécurité sociale au niveau national. La notion de vulnérabilité est particulièrement plus importante dans le cadre du travail informel du fait de ce manque de protection sociale. En effet la vulnérabilité désigne la probabilité pour

un individu de voir sa situation ou ses conditions de vie se dégrader ou s'enfoncer, quel que soit son niveau de richesse, face aux fluctuations de la vie. Plus un individu doit faire face à une grande variété de risques, plus il est vulnérable (Rousseau, 2003).

La protection sociale des travailleurs dans le secteur informel dans les pays en développement doit faire face au moins à deux types de garanties :

- La **garantie contre les risques** auxquels sont confrontés les travailleurs sur leur lieu de travail, ou environnement de travail et pouvant entraîner une baisse potentielle du revenu. Ce principe garantit et assure la continuité d'un revenu et d'un bon état de santé au travailleur durant la carrière professionnelle. Il s'agit d'une série de mesures liées aux soins de santé, à la protection sociale en cas d'incapacité, à la protection en cas de repos de maternité,

- La **garantie d'un revenu** pour le travailleur et sa famille à la retraite, permettant de ne pas tomber en dessous du seuil de pauvreté (Canagarajah and Sethuraman, 2001).

En étant peu qualifié et en absence d'allocation chômage, il est alors difficile de chercher un travail décent dans un contexte de chômage important. De plus, en absence de revenus, l'accès aux soins médicaux reste problématique. En cas de maladie, d'accident de travail, de perte d'emploi ou de vieillesse, les travailleurs n'ont pas accès à un système de protection sociale qui les aide à surmonter ces « accidents de la vie ». Rarement organisés en syndicats et dépourvus de protection sociale formelle, de nombreux travailleurs font face aux situations difficiles grâce à des mécanismes informels de cotisation comme la tontine ou les aides des familles. Ces mécanismes informels d'assurance sociale sont surtout basés sur le principe tantôt de la solidarité, tantôt de la réciprocité avec le développement de systèmes de « micro-assurance ». La micro-assurance en santé est un système d'assurance, souvent initié par un acteur de la société civile, dont l'objet est d'apporter une couverture d'assurance santé aux personnes exclues des systèmes formels de protection sociale, c'est-à-dire principalement les travailleurs de l'économie informelle et leurs familles (Bureau international du travail, 2002). N'ayant pas recours au système bancaire et très rarement aux services de la micro finance, la majeure partie des travailleurs informels ne pensent pas domicilier leurs revenus dans des structures financières officielles.

- **Santé et sécurité des travailleurs informels**

Le travail joue un rôle majeur dans la production des inégalités sociales de santé. D'une part, il détermine la place qu'on occupe dans la société, d'autre part, les conditions et l'organisation du travail ont des effets directs sur la santé (Volkoff and Thébaud-Mony, 2000). Des mesures ont été proposées pour développer une approche « santé et sécurité au travail » dans les pays en développement. Ces propositions se sont appuyées sur les résultats d'études

provenant du secteur informel urbain de 5 villes d'Afrique Subsaharienne (Johannesburg et Cape Town en Afrique du Sud, Dar Es Salaam en Tanzanie, Douala au Cameroun et Harare au Zimbabwe). La malnutrition, l'accès à l'eau potable, la sexualité à risque, le tabac, l'alcool, et les dangers liés au travail étaient les principaux facteurs à l'origine de maladies et de blessures chez les travailleurs pauvres de l'économie informelle (Swuste and Eijkemans, 2002). Au Zimbabwe, une enquête menée dans le secteur informel a permis de mettre en évidence la multiplicité des risques professionnels. En considérant le grand nombre de blessures et de maladies, les risques encourus étaient de 10 à 100 fois plus fréquents dans le secteur informel que dans le secteur formel (Loewenson, 1998).

Parmi les facteurs responsables de maladies, de blessures ou de décès liés au travail, dans les pays en développement, on peut citer (Takala, 2005) :

- La pénibilité du travail qui est plus importante,
- Les conditions tropicales de température et de climat bien souvent plus difficiles,
- Le faible niveau de connaissance et de sensibilisation sur les risques liés au travail,
- L'utilisation de machines et d'équipements bien souvent inadaptés,
- L'utilisation de certains produits chimiques comme les pesticides, sans mesures de contrôle et de protections appropriées.

Dans les pays en développement, l'informalité touche plus généralement les plus pauvres dont le travail même précaire constitue la seule source de revenus. Les travailleurs pauvres sont définis comme des personnes employées et vivant dans un ménage dont on estime que les membres vivent au-dessous du seuil de pauvreté (les rémunérations ne suffisent pas pour assurer un revenu familial de au moins 1 dollar par jour et par personne). La pauvreté dans l'emploi fournit une indication claire du manque de travail décent (International Labour Office, 2009). La situation de précarité des populations travaillant dans l'informel, les conditions de vie, de logement, de revenus et de protection sociale accentuent la vulnérabilité vis-à-vis de différentes maladies. La pauvreté contraint alors la plupart des personnes à opter pour des emplois peu attrayants dans le secteur informel, et les faibles revenus que ces emplois génèrent, créent un cercle vicieux. C'est dans les zones rurales des pays en développement que l'on retrouve le plus de pauvres, exerçant des activités en dehors de l'économie formelle que ce soit l'agriculture ou des activités rurales non agricoles. Du fait des mauvaises conditions de travail et de l'absence de sécurité sociale, les travailleurs de l'économie informelle peuvent être frappés par la maladie pendant leurs années les plus productives contraignant ainsi les personnes âgées et les enfants (groupes les plus vulnérables) à trouver un travail de survie, en cas de décès des principaux soutiens de famille. L'automédication est devenue une habitude pour les travailleurs qui n'ont pas les moyens financiers de voir un médecin. Au

Cameroun, les mesures de prise en charge sociale ou les systèmes de financement qui garantissent la réduction des inégalités entre les classes sociales sont fortement limitées par les faibles capacités d'une économie qui repose essentiellement sur l'informel (Moubé, 2015).

Les liens existant entre pauvreté et économie informelle étant très étroits et interactifs, la mise en place de politiques d'éradication de la pauvreté contribuerait à améliorer la productivité. Toutefois, l'éradication de la pauvreté n'étant pas un objectif atteignable dans l'immédiat, il est urgent de s'intéresser aux améliorations potentielles pouvant être mises en œuvre en ce qui concerne les facteurs de risques secondaires à la pauvreté. En Amérique latine, le lien positif entre informalité et pauvreté existe, mais la suppression de l'informalité ne suffirait pas à l'éradication de la pauvreté (Maurizio, 2012). La pauvreté des ménages travaillant dans l'économie informelle est également le dénominateur commun du travail des enfants. L'ONU définit tout travail susceptible de nuire à la santé ou au bien-être des enfants et/ou de les exposer à un danger comme « pire forme de travail des enfants ». Le travail des enfants dans l'économie informelle reste encore une réalité malgré les conventions 38 (sur l'assurance-invalidité, 1933) et 182 (sur les pires formes de travail des enfants, 1999) de l'OIT. Face à la pauvreté et au sous-développement, certains parents, ne trouvent d'autres issues que de mettre leurs enfants au travail afin de diminuer les charges. De nombreux projets et programmes nationaux et internationaux ont été mis en œuvre pour lutter contre le travail des enfants, notamment au Bénin (Vodounou et al., 2009).

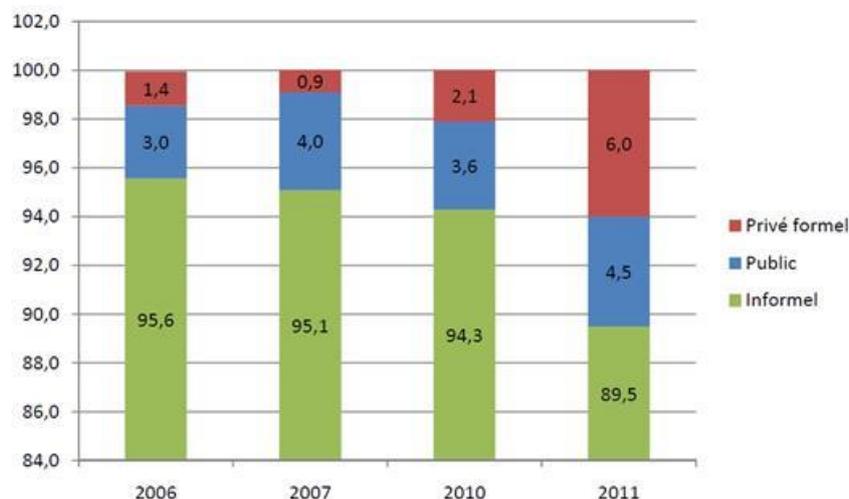
I.1.4. Généralités sur le marché du travail et l'économie informelle au Bénin

Le Bénin est un pays de l'Afrique de l'Ouest, d'une superficie de 114 763 Km² avec comme capitale économique, la ville de Cotonou qui concentre la majorité des activités économiques du pays.

Au Bénin, selon le rapport de l'Enquête Modulaire Intégrée sur les Conditions de Vie des ménages (EMICoV) en 2011, 90,4 % des actifs occupés de 15-64 ans travaillaient dans le secteur informel, 4,6 % dans le secteur formel public et 4,9 % dans le secteur formel privé (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2011). Entre 2006 et 2011, l'emploi informel au Bénin régresse légèrement même si les taux restent encore très élevés (voir figure 3).

Figure 3 : Evolution de l'emploi selon le type de l'emploi de 2006 à 2011

Source : (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2011)



- Les points forts de l'économie informelle au Bénin : (Akplogan Dossa et al., 2011)
 - Existence d'un cadre formel de formation technique et professionnelle de type « dual » des acteurs du secteur,
 - Poids démographique des acteurs,
 - Pluralité des branches d'activités du secteur informel avec onze principales branches, à savoir : le bâtiment, l'alimentation, les métaux et la construction métallique, les pierres, les fibres végétales, les textiles, l'habillement, le cuir et les peaux, l'art et la décoration, la poterie et la céramique, l'installation et maintenance électrique, la réparation et la photographie, l'électronique, l'électricité et le froid, l'hygiène et les soins corporels,
 - Activités de réexportation,
 - Manne financière que draine le secteur informel : La contribution du secteur au PIB est de l'ordre de 67,3 % selon le rapport de 2006 de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Cette contribution est évaluée à 65 % par le même institut en 2008.
- Les faiblesses et contraintes de l'économie informelle au Bénin : (AKPLOGAN DOSSA et al., 2011)(50)
 - Faiblesse du cadre réglementaire et légal,
 - Méfiance entre les nationaux et difficultés de travailler ensemble,
 - Manque de qualification des acteurs,
 - Précarité des emplois offerts et prévalence de l'auto-emploi,

- Faible capitalisation du secteur,
- Difficulté de financement du secteur (développement des tontines et des prêts usuriers dans le fonctionnement des activités du secteur informel),
- Faible formalisation des entreprises du secteur au Bénin caractérisée par l'inexistence de comptabilité écrite,
- Inscription à la Chambre de Commerce et d'Industrie du Bénin (CCIB) : à peine 5 % des entreprises béninoises opèrent dans la légalité,
- Difficulté de se conformer aux normes et à la qualité,
- Difficultés de généralisation et de mise en œuvre de l'Identifiant Fiscal Unique (IFU).

Le Bénin présente une des économies dont la part du secteur informel dans le PIB est la plus importante en Afrique de l'Ouest. La contribution du secteur au PIB est de l'ordre de 67,3 % selon le rapport de 2006 de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Cette contribution est évaluée à 65 % par le même institut en 2008.

- Marché du travail au Bénin et pauvreté :

La participation ou non au marché du travail au Bénin n'est pas considérée comme un paramètre principal permettant d'expliquer la pauvreté. Par contre, la qualité et la productivité de l'emploi occupé étaient deux facteurs clés en lien avec la pauvreté. Selon le BIT, la population active comprend toutes les personnes des deux sexes qui fournissent, durant une période de référence spécifiée, la main-d'œuvre disponible pour la production de biens et services, comme définis par les systèmes de comptabilité nationaux des Nations Unies (SCN). Elle est égale à la somme de toutes les personnes en âge de travailler qui occupent un emploi et ceux qui sont au chômage (Organisation de Coopération et de Développement Économiques, 2003). Au Bénin, est déclaré chômeur un individu qui répond aux trois conditions suivantes : être sans travail au cours de la période de référence (généralement la dernière semaine avant l'enquête), être à la recherche active d'un emploi et être disponible pour travailler (soit immédiatement ou dans deux semaines). Du fait de l'absence d'assurance chômage, de nombreux demandeurs d'emploi acceptent des emplois de moindre qualification ou dans des unités économiques moins productives pour ne pas être sans revenus. Ils reçoivent de ce fait des revenus inférieurs à ce qu'ils pourraient obtenir normalement. On parle alors au Bénin d'un sous-emploi lié au marché du travail, associé à un faible taux de chômage selon le BIT. Le concept du « paradoxe du taux de chômage au Bénin » désigne plus particulièrement le fait que les taux de chômage observés sont bas au Bénin, alors que dans

la vie active, de nombreux jeunes se plaignent de ne pas trouver d'emplois. L'évolution du taux de chômage au Bénin est présentée tableau 2.

Tableau 2 : Evolution du taux de chômage des 15-64 ans entre 2006 et 2011

Source : (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2011)

Milieu de résidence	2006	2007	2010	2011
Cotonou	9,3	5,1	3,2	6,1
Autres urbains	3,9	0,8	1,1	3,5
Ensemble urbain	5,3	1,9	1,7	4,3
Rural	0,8	0,2	0,5	1,5
BENIN	2,3	0,9	1,0	2,7

Le chômage au Bénin semble en hausse en 2011 (2,7%) et revient à peu près à la situation de 2006 (2,3%) après des niveaux de chômage bas observés en 2007 (0,9%) et 2010 (1,0%). Quelle que soit l'année, le taux de chômage à Cotonou est largement au-dessus du niveau national (9,3% en 2006, 5,1% en 2007, 3,2% en 2010 et 6,1% en 2011).

- Situation de l'emploi au Bénin :

Au Bénin on retrouve deux types d'activités informelles selon que l'on est en milieu rural ou urbain. En milieu rural, l'agriculture est l'activité prépondérante alors qu'en milieu urbain, ce sont les activités artisanales. Aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain la population active est généralement occupée (79,1 % d'actifs occupés en milieu rural et 70,4 % en milieu urbain). Ces activités sont le plus souvent précaires et dominées par un sous-emploi des individus. Au niveau national, environ 93 % des actifs occupés sont employés dans le secteur informel (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2013).

I.1.4.1. La sécurité sociale pour les travailleurs au Bénin

La Constitution du 11 décembre 1990 garantit à tout citoyen béninois une protection sociale. Selon l'article premier de la loi 98-019 du 21 Mars 2003, un régime de sécurité sociale en faveur des travailleurs du secteur structuré soumis aux dispositions du code du travail et un régime spécial en faveur des travailleurs indépendants, agricoles et du secteur informel est institué. Le régime béninois de sécurité sociale des travailleurs indépendants comprend les branches : pensions, maladie-maternité et risques professionnels. Deux organismes parapublics (Caisse Nationale de Sécurité Sociale (CNSS) et le Fonds National de Retraite du Bénin (FNRB)) ainsi que des mutuelles sociales sont chargés de cette mission. Plus récemment, des services d'assurance sociale couvrant l'économie informelle se sont

développés comme la Mutuelle de sécurité sociale du Bénin (MSSB) aujourd’hui dénommée **Caisse Mutuelle de Prévoyance Sociale** (CMPS). Créée en 1999 à Cotonou, elle est une initiative du gouvernement béninois suite à un travail réalisé par le BIT en vue de l’extension de la sécurité sociale aux travailleurs de l’économie informelle. Ces mutuelles ont connu une extension vers les autres grandes villes du Bénin. Les prestations délivrées par la CMPS sont présentées tableau 3.

Tableau 3 : Prestations et taux de remboursements de la Caisse Mutuelle de Prévoyance Sociale Source : Ministère du Travail, République du Bénin

Prestations couvertes	Taux de remboursement
Consultation médecine générale adulte et enfants	
Consultations spécialisées	
Consultations pré et post natales	
Accouchements simples, compliqués et les césariennes	
Hospitalisation de jour (mise en observation)	
Hospitalisation (frais de séjour)	70 %
Actes de chirurgie	
Examens de laboratoire	
Imagerie médicale (radiologie et échographie)	
Soins infirmiers	
Consommables médicaux et médicaments délivrés par les officines des structures sanitaires conventionnées	

En décembre 2015, l’assemblée nationale du Bénin a adopté la loi sur le Régime Assurance Maladie Universelle (RAMU) permettant d’assurer une couverture efficace des risques liés à la maladie, aux accidents non professionnels et à la maternité. Les accidents de travail, les maladies professionnelles et les accidents de la circulation étant déjà couverts par un autre régime, ne sont pas pris en compte dans le RAMU (Assemblée Nationale, 2015). Le RAMU s’applique aux travailleurs salariés du secteur privé quel que soit leur statut, aux travailleurs indépendants quels que soient le domaine ou la nature de leur activité, aux Béninois économiquement faibles (toute personne physique dont le revenu est inférieur au Salaire Minimum Interprofessionnel Garanti). Les conditions de bénéfice du RAMU sont présentées au tableau 4.

L’ANAM (Agence Nationale d’Assurance Maladie) est un établissement public à caractère social qui a pour rôle d’assurer la mise en œuvre et de veiller à la mise en place des outils de régulation du RAMU. Les groupes sociaux concernés par le RAMU sont récapitulés tableau 5.

Malgré le grand nombre de dispositifs et d'efforts mis en place par le gouvernement, les Béninois demeurent très inquiets quant à déposer leurs cotisations directement dans les caisses de l'état.

Tableau 4 : Conditions de bénéfice de la Caisse Mutuelle de Prévoyance Sociale (CMPS) et formations sanitaires concernées Source : Ministère du Travail, République du Bénin

Personnes concernées	Cotisations	Conditions	Formations sanitaires à Cotonou
Associations, organisations ou groupements d'hommes et femmes de métiers ou de profession libérale et tout individu	600 F CFA / personne / mois	être à jour dans le paiement de leurs cotisations et avoir terminé une période d'observation fixée à trois (3) mois.	Hôpital Ménontin, Hôpital Saint jean, Hôpital Suru Léré, Centre de santé Toussaint Louverture, centre de santé Saint Jean Maria Gleta ; Hôpital santé pour tous à Calavi

I.1.4.2. Les branches d'activités de l'économie informelle au Bénin

Selon l'INSAE (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Économique) du Bénin, il est possible d'appréhender la situation des entreprises par rapport à leur mode d'organisation et de gestion, afin d'apprécier leur « degré d'informalité ». Il existe quatre variables pour apprécier le degré d'informalité des entreprises :

- L'enregistrement auprès des institutions,
- La tenue de comptabilité sous une forme établie,
- Le statut de l'entreprise,
- La taille de l'unité de production.

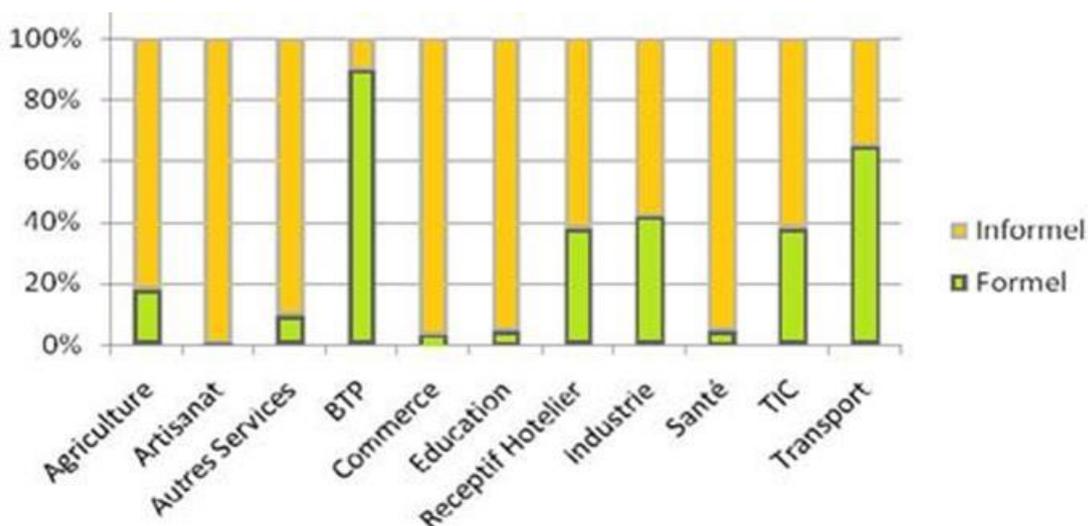
L'économie informelle est présente dans tous les secteurs d'activités au Bénin. Dans l'artisanat la situation de l'informalité est plus particulièrement prononcée (figure 4).

Tableau 5 : Groupes sociaux concernés par le RAMU

Source : (Ministère de la santé, 2015)

Groupes sociaux
Acteurs du secteur informel : artisans, petits revendeurs, petits commerçants non déclarés, conducteurs de taxi motos...
Acteur du secteur agricole : agriculteur, éleveurs, producteurs du monde rural...
Salariés dont le revenu mensuel net d'impôt est très instable ou est inférieur au SMIG, dockers, manutentionnaires...
Enfants de moins de 18 ans
Indigents (couche sociale la plus vulnérable)

Figure 4 : Taux de présence de l'informel dans les différentes branches d'activité au Bénin
(Akplogan Dossa et al., 2011).



Le secteur de l'artisanat a bénéficié d'une réglementation avec un code de l'artisanat adopté en 2001. Ce code a permis de préciser les activités artisanales, la typologie des activités, les conditions d'exercice des activités et les obligations institutionnelles des artisans (Akplogan Dossa et al., 2011). Le Bénin se distingue, par rapport aux autres pays de l'Afrique de l'Ouest, par son processus d'amélioration des conditions-cadres dans le secteur de l'artisanat et par la mise en place d'un arsenal juridique de textes législatifs et réglementaires :

- Loi n°98-037 du 22 novembre 2001 portant sur le Code de l'Artisanat en République du Bénin,

- Décret n°2003-569 du 29 décembre 2003 portant sur la nomenclature des métiers de l'artisanat au Bénin,
- Décret n°2003-557 du 24 décembre 2004 qui a consacré la création des Chambres Interdépartementales de Métiers (CIM) et de l'Union des Chambres Interdépartementales de Métiers du Bénin (UCIMB),
- Décret n°2005-788 du 29 décembre 2005 qui consacre la Politique Nationale du Développement de l'Artisanat au Bénin (PNDA),
- Arrêté n°2005/MCAT/DC/SG/DNA/SA du 13 décembre 2005 portant sur l'organisation de l'apprentissage en milieu artisanal en République du Bénin qui précise les conditions générales et la formation du contrat d'apprentissage.

La mise en application des différentes lois régissant ce secteur n'est pas facile en raison de l'inexistence des textes d'application. Jusqu'à présent, la formation des artisans est assurée par les maîtres-artisans dans un cadre traditionnel de formation du fait du nombre réduit des centres de formation, de la faiblesse du nombre des formateurs ainsi que par l'absence de programme formel (Conseil Economique et Social, République du Bénin, 2010). L'architecture organisationnelle du secteur de l'artisanat présente 210 métiers répartis en 42 corps de métiers regroupés en 11 branches d'activités (Bâtiment ; alimentation ; métaux et constructions mécaniques ; pierre ; textile, habillement, cuir et peaux ; fibres végétales ; poterie et céramique ; électronique, électricité et froid ; art et décoration ; installation, maintenance, entretien, réparation et images ; hygiène et soins corporels) (Davodoun, 2007).

I.1.4.3. Secteur informel et artisanat au Bénin

L'économie du Bénin est dominée par le secteur informel qu'on retrouve dans chaque branche d'activité avec une prédominance dans l'artisanat. Longtemps resté inexploré et peu documenté, la mise en place d'une nomenclature des corps de métiers de l'artisanat par la Confédération Nationale des Artisans du Bénin (CNAB) est encore récente. Cette nomenclature a permis de connaître les différentes branches d'activités présentes dans l'artisanat et favoriser des investigations plus approfondies. Depuis les années 60, les différents gouvernements ont progressivement pris conscience de la place de l'artisanat dans le développement économique du Bénin, de l'importance de sa contribution à la formation des jeunes et de la puissance de l'alternative qu'il constitue dans la lutte contre la pauvreté (Davodoun, 2007). Le deuxième recensement général des entreprises artisanales au Bénin a montré que le département du Littoral (Cotonou) abritait 30 % des unités artisanales. Les unités artisanales sont pour la plupart des entreprises individuelles (98,6 %), évoluant en général dans l'informel et ne nécessitant pas de formalités administratives complexes ni des

moyens financiers importants. Il s'agit de micro entreprise individuelles dans la plupart des cas (tableau 6).

Tableau 6 : Répartition selon la forme juridique des entreprises artisanales au Bénin

Source : (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2010)

Forme Juridique	%
Entreprise individuelle	98,6
Société de fait	0,4
SARL	0,3
Société en Nom Collectif (SNC)	0,3
Coopérative	0,2
Groupement d'Intérêt Economique (GIE)	0,1
Société en participation	0,0
SA (Société anonyme)	0,0
Société en Commandite Simple (SCS)	0,0
Total	100,0

- Formation professionnelle en secteur informel

Le Bénin présente la particularité d'avoir inscrit le secteur informel dans le champ de compétences des partenaires sociaux. Il est l'un des rares pays d'Afrique de l'Ouest où le niveau de vie des travailleurs et leurs conditions de travail se sont améliorées grâce à la rationalisation et au développement de la formation professionnelle. Cette stratégie a pour but d'améliorer le niveau de compétence et de passer d'une économie de subsistance à une économie de croissance et de développement (Walther, 2006).

I.1.4.4. Cas des forgerons ferblantiers de la branche « Métaux et constructions métalliques »

Le terme « ferblantier », désigne communément, toute personne qui travaille la tôle d'une épaisseur maximale de 10 jauges (fer, cuivre, aluminium, acier inoxydable et autre matière similaire) (Huneault et al., 1984). Pour cela, le ferblantier :

- Trace, fabrique et pose, sur les chantiers de construction, toutes sortes d'objets en métal en feuilles,
- Fait le montage et la réparation de systèmes de ventilation, de climatisation, de chauffage à air chaud et tout système pour l'évacuation de matières diverses, telles

que copeaux, vapeurs, fumées ou poussières, pose les isolants intérieurs en rapport avec ces systèmes et met en place des appareils préfabriqués,

- Fait tout autre travail analogue tel que le revêtement métallique de lanterneaux, de corniches, de coupe-feu et de solives ; l'installation de gouttières et d'autres objets métalliques préfabriqués, tels que tablettes, casiers, cloisons, revêtements muraux, écrans et plafonds.

Les forgerons et les ferblantiers sont classés parmi les artisans dans la branche d'activité « Métaux et Constructions métalliques » (tableau 7).

Tableau 7 : Classification des métiers dans la filière Métaux et constructions métalliques à Cotonou Source : (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2010)

Branche	Corps de métiers	Métiers
Métaux et constructions métalliques	Constructions métalliques	Soudeurs Tôliers Ferblantiers Charpentiers métalliques Cuivreurs Menuisiers aluminium
	Forge et outillage	Forgerons Outils Fabricant de couveuses Armuriers (Fabricants de fusil traditionnels) Fondeurs d'aluminium, de bronze et de cuivre Chaudronniers Fabricants de matériels et équipements

Les étapes de la technique de production sont généralement le lavage, le séchage, le découpage et le perçage, le modelage, l'assemblage, puis vient la vente des produits finis. Les produits fabriqués sont des lampions, des entonnoirs, des petits récipients, des pièces de rechange de réchaud et même des réchauds entiers. Le ferblantier se sert de son soufflet, de son fer à souder, d'une pince, de l'étain et de l'acide préparé avec du zinc pour réaliser les soudures afin de garantir la solidité de l'objet et de faire ressortir son aspect esthétique. Ils peuvent être sollicités par les soudeurs ou mécaniciens en vue de diminuer la résistance de fers massifs par chauffage, selon l'usage souhaité. On peut également retrouver une activité proche de celle des forgerons dont le rôle est de façonner un métal afin de lui donner une forme sous l'effet du feu (Cercle International pour la Promotion de la Création - Bénin, 2003). En raison de leurs compétences diversifiées pour le travail des métaux, ils sont appelés « **Forgerons-ferblantiers** ».

Encadré 2 : L'activité de forgeage des forgerons-ferblantiers

Le forgeage est un procédé de mise en forme de métaux malléables par martelage ou pressage, le plus souvent par déformation plastique à chaud. Le métal forgé est plus résistant et plus ductile que le métal coulé, et apte à de grandes variations thermiques et contraintes mécaniques. Il y a plusieurs types d'opérations de forgeage (martelage, estampage, matriçage, extrusion ...). C'est ainsi que la mise en forme de pièces métalliques (à partir de barres, d'ébauches ou de lopins de métal) par application de puissants chocs ou efforts de compression est une opération réalisée :

- Soit à chaud, par un dispositif de frappe (martelage) contre un support (enclume) ou par pression entre deux blocs (matrices d'estampage).
- Soit à froid, par une très forte pression exercée par un poinçon (extrusion) dans une matrice.

Dans l'industrie automobile, le forgeage est utilisé pour produire des pièces en acier forgé, de moteur (bielles, vilebrequins, ...), de transmissions (arbres et couronnes de différentiel, ...) et de suspensions, et s'effectue au moyen de billettes chauffées par induction placées sur des presses à forger ou par un forgeage sur des marteaux-pilons.

Source : http://www.officiel-prevention.com/protections-individuelles/vetements-ininflammables/detail_dossier_CHSCT.php?rub=91&ssrub=185&dossid=550

- Machines et outils utilisés

Chez les ferblantiers, les matières premières mises en œuvre et utilisées peuvent être des boîtes de conserve, des métaux de récupération, de l'étain ou d'autres alliages métalliques mais également des produits chimiques comme l'acide chlorhydrique. Les équipements de travail sont bien souvent basiques et précaires. Ces équipements peuvent être des fers à souder, des marteaux, des grattoirs, des enclumes, des maillets (marteau en bois), des pinces (pour retirer les objets chauds du feu), des pinceaux, des soufflets pour maintenir le feu, des coques de noix palmiste utilisées comme combustible (voir photo 1).

Photos 1 : Artisans ferblantiers au travail dans un atelier de Cotonou (YEDOMON, 2015)



Forgeage au soufflet traditionnel avec roue



Soudage avec un fer à souder

- Dangers et risques pour la santé :

- **Risques chimiques et atteintes neurotoxiques liés au métier de ferblantier**

En milieu professionnel, les intoxications résultent souvent de l'inhalation des fumées ou vapeurs métalliques. La toxicité professionnelle s'exprime généralement en termes d'exposition chronique car la plupart des produits chimiques toxiques ont un pouvoir cumulatif. La composition des fumées varie selon les procédés et les matériaux mis en œuvre. Les polluants générés par les fumées de soudage peuvent être répertoriés en polluants gazeux et polluants particulaires. Les **polluants gazeux** sont : le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, l'ozone et les gaz issus des revêtements et contaminants (phosgène, cyanure d'hydrogène, formaldéhyde, diisocyanate de toluylène). Les **polluants particulaires** sont : les oxydes de fer, l'oxyde d'aluminium, l'oxyde d'étain, les oxydes de manganèse, les fluorures, les oxydes de zinc et de cuivre, les composés du plomb et du baryum, les oxydes de molybdène et de magnésium.

Du point de vue biologique, certains métaux et métalloïdes comme le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le sélénium et le zinc sont des ETM indispensables à la vie. La carence tout comme la surcharge en ces éléments peut s'avérer nocive. A l'inverse, certains éléments comme l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb n'ont aucun rôle biologique connu et sont très souvent nocifs. Certains polluants particulaires sont cancérogènes, c'est le cas des composés du chrome VI, les oxydes de nickel, les oxydes de cadmium, de béryllium,

et d'autres potentiellement cancérigènes, mais ce risque est moins connu (cobalt, plomb, le dioxyde de titane, le pentoxyde de vanadium) (Ricaud, 2012).

On distingue parmi les syndromes neurotoxiques, les syndromes du système nerveux central et ceux du système nerveux périphériques. L'exposition à des métaux (plomb, mercure, dérivés organiques de l'étain, lithium...) ou à des vapeurs (pesticides organochlorés ...) peut entraîner des neuropathies périphériques. Ces neuropathies périphériques peuvent se traduire par des pertes de la sensibilité, des pertes de force, des troubles du système nerveux, une diminution de la tension artérielle, un œdème des membres inférieurs et une dysfonction érectile. Le temps de réaction, la coordination entre la vue et l'ouïe, les mémoires immédiates, visuelle et auditive, l'attention et la vigilance, la dextérité manuelle, le vocabulaire, la réorientation de l'attention, la force de préhension, la vitesse motrice, la fermeté des mains, l'humeur, la perception visuelle des couleurs, la sensibilité à des contrastes visuels, la perception vibro tactile, l'ouïe et l'odorat sont quelques-unes des nombreuses fonctions pouvant être altérées par diverses substances toxiques (Gérin et al., 2003). L'intoxication au plomb (saturnisme) passe longtemps inaperçue, ne donnant que des symptômes généraux (nausées, fatigue, pâleur...). Si la contamination ne cesse pas, des troubles graves s'installent, particulièrement chez l'enfant (troubles des apprentissages, retard de croissance...) et chez la femme enceinte (troubles du développement fœtal, accouchement prématuré...). Chez l'adulte, l'intoxication par le plomb peut être responsable d'atteinte des nerfs périphériques des membres supérieurs, d'hypertension artérielle, de maladie rénale chronique et de baisse de la fertilité chez l'homme.

Dans une étude menée à Cotonou chez les enfants ferblantiers, 9 enfants sur 10 présentaient un taux d'hémoglobine inférieur à 12 g/dl traduisant ainsi une anémie qui pouvait résulter de la conjonction de plusieurs facteurs tels que l'exposition à l'étain, un poly parasitisme ou une endémie palustre (Tossou, 2001). Il serait donc intéressant dans le cadre d'une étude plus approfondie d'évaluer le niveau sanguin en métaux lourds et éléments traces essentiels. Selon le rapport d'études sur l'Artisanat de recyclage, publié par le Cercle International pour la Promotion de la Création (CIPCRE-Bénin), les ferblantiers utilisent de l'étain et de l'acide chlorhydrique pour souder les plaques de fer blanc et sont ainsi exposés à des fumées contenant des gaz et des particules (Cercle International pour la Promotion de la Création - Bénin, 2003).

- **Les risques physiques liés au métier de ferblantier**

Blessures et traumatismes : les forgerons ferblantiers travaillent dans des ateliers de fortune et sont souvent victimes de coupures aux doigts et aux orteils, du fait de leurs activités

de découpe au travail et en absence d'équipements adaptés (Cercle International pour la Promotion de la Création - Bénin, 2003).

Bruits : les ferblantiers sont également exposés à des bruits aussi assourdissants les uns que les autres, liés au bruit du marteau sur des tôles de différentes épaisseurs (Cercle International pour la Promotion de la Création - Bénin, 2003). L'exposition aux bruits lésionnels provoqués par les travaux sur les métaux (décolletage, l'emboutissage, l'estampage, le broyage, le fraisage, le martelage, le burinage, le rivetage, le laminage, l'étrépage, le tréfilage, le découpage, le sciage, le cisailage, le tronçonnage par percussion, abrasion ou projection) peut être responsable d'atteinte auditive d'origine professionnelle (Delépine et al., 2015). Le tableau 9 montre la classification des déficiences auditives selon le Bureau International d'AudioPhonologie (BIAP) en fonction du niveau de perte tonale. L'exposition excessive aux bruits de marteaux dans les ateliers, est susceptible d'entraîner des atteintes auditives. Selon l'OMS, la dose de bruit jugée sans danger pour la santé est estimée à 75 dBA sur 8h. Dans le travail de Tossou et al, les niveaux de bruits étaient toujours supérieurs 90 dB avec des pics entre 10H et 14H (Tossou, 2001). Les bruits de marteau sont appelés bruits d'impact. Il a été démontré que le degré d'atteinte de l'audition est plus importante avec des bruits d'impact qu'avec une dose équivalente de bruits continus (Thiery and Meyer- Bisch, 1988). L'une des conséquences sanitaires de l'exposition au bruit sera l'installation d'une surdité insidieuse dont les premiers signes se manifestent dans les hautes fréquences autour de 4 kHz. Le bruit en tant qu'agent de stress pourrait avoir comme effet, une modification de la structure du sommeil, des effets psycho-physiologiques, des effets sur la santé mentale et les performances (Gérin et al., 2003).

Tableau 8 : Classification audiométrique des déficiences auditives selon le BIAP*

Classification audiométrique	Perte tonale moyenne
Audition normale ou subnormale	≤ 20 dB
Déficience auditive légère (DAL)	21 - 40 dB
Déficience auditive moyenne (DAM)	41 - 55 dB = DAM1
	56 - 70 dB = DAM2
Déficience auditive sévère (DAS)	71 - 80 dB = DAS1
	81 - 90 dB = DAS2

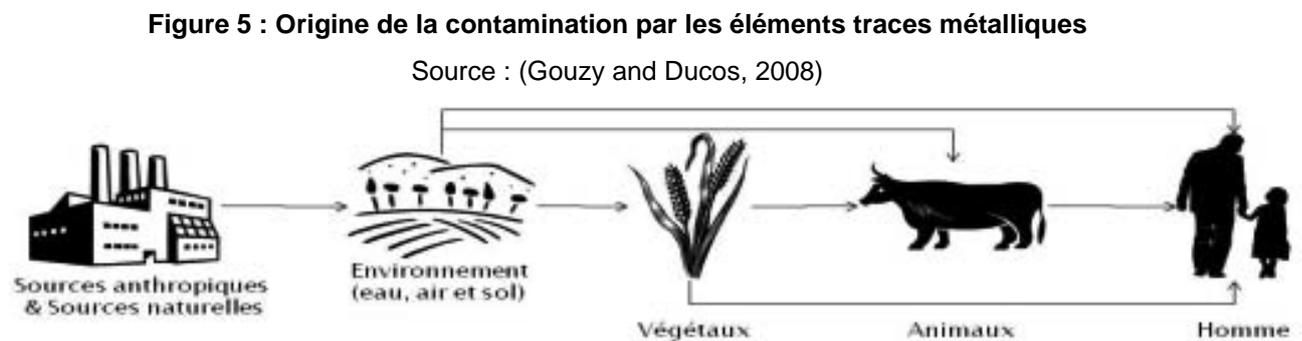
*Bureau International d'AudioPhonologie

Chaleur : il n'existe pas de définition fixée par le code du travail déterminant le travail à la chaleur. La plage de températures de confort se situe entre 19 et 27°C, avec une humidité comprise entre 35 et 60 %. Au-delà et en deçà débutent les sensations d'inconfort. La norme

AFNOR X35-203 (ISO 7730) précise les « conditions de confort » au travail ». Des températures ambiantes très élevées peuvent accabler les mécanismes de thermorégulation de l'organisme et provoquer des troubles graves, voir être mortelles. L'exposition à la chaleur peut entraîner une déshydratation et la survenue d'une fatigue, des crampes musculaires, enfin et le plus grave, un coup de chaleur (se manifeste par une température corporelle souvent supérieure à 41°C et une perte de conscience partielle ou totale).

I.2. Éléments traces métalliques en population humaine

Le terme « Eléments Traces Métalliques » (ETM) plutôt que celui de « métaux lourds » est préféré et est destiné à couvrir les principaux composés métalliques toxiques et métalloïdes. En effet certains métaux toxiques (au-delà d'une certaine dose) ne sont pas particulièrement « lourds » (par exemple le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas des métaux (c'est le cas de l'arsenic qui est un métalloïde). L'exposition de la population aux substances chimiques de l'environnement en éléments traces métalliques peut provenir de différentes sources environnementales car ces éléments sont largement distribués dans l'air, l'eau, le sol et d'autres compartiments de l'environnement à la suite des rejets anthropiques ou géologiques (voir figure 5).



Certains ETM sont des oligoéléments indispensables à la biologie des organismes alors que d'autres peuvent lui nuire gravement. Contrairement aux éléments métalliques et métalloïdes toxiques, sans aucun rôle physiologique comme le mercure, le cadmium et le plomb, les oligo-éléments sont des métaux ou métalloïdes, minéraux purs, naturellement présents en faible quantité (inférieure à 0,01 %) dans l'organisme. Ces oligo-éléments jouent soit un rôle physiologique en influençant le fonctionnement cellulaire (activité enzymatique, expression des signaux hormonaux, défense de l'organisme) soit un rôle structural. L'absence ou l'excès de ces oligo-éléments essentiels à l'organisme peut s'avérer délétère. Ces éléments sont présentés dans le tableau 9, et il s'agit du fer, du zinc, du magnésium, du cobalt, du molybdène, de l'iode, du chrome, du sélénium, du cuivre, du fluor, du vanadium, du silicium ou encore du manganèse.

Tableau 9 : Oligo-éléments essentiels à l'organisme marqués en fond gris
 Source : (Bonnefoy, 2005)

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ru	Tc	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Os	Re	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tp	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

On peut distinguer :

- Les oligo-éléments essentiels à risque de carence démontré chez l'homme : iode, fer, cuivre, zinc, sélénium, chrome, molybdène.
- Les oligo-éléments essentiels à faible risque de carence (non prouvée chez l'homme) : manganèse, silicium, vanadium, nickel, étain.

I.2.1. Principaux ETM et leur toxicité

L'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se) et le zinc (Zn) sont considérés comme des éléments traces métalliques à risque pour la santé humaine (Bourrelier et al., 1998). Selon le Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques (PISSC) de l'OMS, dix produits chimiques posent un problème majeur de santé publique. On peut citer parmi ces 10 produits, 4 éléments traces métalliques ou métalloïdes posant un problème de santé publique. Il s'agit de l'arsenic, du cadmium, du mercure et du plomb. En effet ces éléments n'ont aucune fonction biologique connue et sont considérés comme des poisons (Bourrelier et al., 1998). Les principales manifestations cliniques de quelques éléments métalliques toxiques sont présentées tableau 10.

Tableau 10 : Principales manifestations cliniques de quelques éléments métalliques toxiques

Source : (Dehon et al., 2001)

Arsenic	“Choléra arsenical”, mélanodermie, polynévrite, cirrhose, toxicité cardiaque, atteinte des ongles, cheveux et muqueuses, cancer de la peau, des poumons
Beryllium	Conjonctivites, dermites, pneumopathie, fibrose pulmonaire
Cadmium	Fièvre des fondeurs, asthme, atteinte rénale, troubles gastro-intestinaux, néoplasme des bronches et des fosses nasales. Déminéralisation osseuse
Chrome	Ulcération de la cloison nasale, pigeonneaux des doigts, dermite de contact, asthme, Bronchopneumopathies obstructives chroniques (BCPO), emphysème néoplasme des bronches et des fosses nasales
Cobalt	Fibrose pulmonaire, allergie
Nickel	Fièvre des fondeurs, pneumopathie, dermite eczématiforme
Plomb	Saturnisme, encéphalopathie, lésions rénales, anémie

Le terme « éléments toxiques » est utilisé pour décrire la dangerosité de l'interaction des éléments chimiques avec les organismes vivants. La toxicité d'un élément chimique dépend de ses propriétés toxico-cinétiques (sous forme ionique ou forme organique moléculaire) et de son interaction avec les mécanismes biochimiques qui se déroulent dans la cellule. L'exposition à de faibles doses de certains éléments métalliques et métalloïdes, ainsi que leur capacité d'accumulation dans les organes cibles, pose un problème de santé publique, en particulier pour les femmes enceintes, les mères qui allaitent, les personnes âgées et les enfants, car ces derniers sont considérés comme les sous-groupes les plus vulnérables de la population (Röllin et al., 2005; Tuakuila et al., 2014). La protection des enfants face à ces dangers, constitue une priorité. Selon le (PISSC) les enfants étant plus vulnérables que les adultes, l'exposition à ces risques chimiques peut entraîner des retentissements au niveau de leur développement physique et cognitif.

Les éléments traces métalliques, métaux essentiels ou non, font l'objet d'analyses chimiques dans le cadre de la surveillance à partir de prélèvements dans l'environnement de travail ou en milieu biologique (sang et autres matrices) compte tenu du potentiel toxique qui leur est attribué.

1.2.1.1. Sources de contamination et toxicité des éléments (Arsenic, béryllium, cadmium, chrome, plomb, mercure (Lauwerys, 2007))

- **Arsenic**

L'arsenic est un métalloïde de couleur gris acier largement répandu dans la croûte terrestre qui peut se présenter dans 4 états de valence -3, 0, +3, et +5. On retrouve donc :

- L'arsenic élément As (0) facilement oxydable à l'air,
- Les dérivés inorganiques de l'arsenic As (-III) combiné avec l'hydrogène sous forme arsine (AsH_3) ; As (+III) ou arsénite qui forme des composés tels que le trioxyde de

diarsenic, le trichlorure d'arsenic, le trisulfure d'arsenic... ; As (+V) ou arséniate qui forme des complexes avec le plomb ou encore avec le calcium,

- Les dérivés organiques de l'arsenic, souvent rencontrés dans les produits de la mer : l'arsénobétaïne en est la forme la plus abondante dans le poisson et les crustacés.

L'exposition peut se produire en milieu professionnel dans les industries de fonte du cuivre, du plomb et de l'or mais également au cours du raffinage du zinc et du cobalt. L'emploi de préparations arsenicales comme insecticides, herbicide ou fongicide est également une réalité dans certaines régions. L'arsenic est utilisé comme agent de préservation du bois exposant ainsi les menuisiers mettant en œuvre du bois traité. Dans l'industrie du verre, l'arsénite de cuivre est utilisé comme agent décolorant. Dans l'artisanat en tannerie, on retrouve des composés à base d'arsenic pour l'épilage des peaux.

L'exposition extra-professionnelle est liée au fait qu'on retrouve l'arsenic sous forme inorganique, adsorbé sur des particules en suspension et dans l'eau sous forme d'arséniate, d'arsénite, d'acide monométhylarsonique ou acide diméthylarsonique. Essentiellement lié à l'ingestion d'aliments et d'eau contaminés, l'exposition non professionnelle à l'arsenic peut prendre diverses formes à savoir :

- A partir du bois traité par contamination directe (contact fréquent avec le bois) ou indirecte (barbecue au feu de bois traité à l'arsenic, lixiviation du bois et contamination de l'eau et du sol),
- A partir de certaines préparations contenant de l'arsenic à visée thérapeutique utilisées dans le traitement des leucémies, du psoriasis, des dermites herpétiformes,
- A partir de la fumée de cigarette.

L'arsenic (III) et l'As (V) interagissent différemment avec les composants cellulaires. L'arséniate As (V) a une structure analogue à celle du phosphate et peut se substituer au phosphate dans les processus de formation de l'ATP (Adénosine Tri Phosphate). Cette action inhibitrice sur la respiration cellulaire mitochondriale semble jouer un rôle dans la toxicité. Quant à l'arsénite, il présente une affinité particulière pour les composés sulfhydriles constitutifs de nombreuses protéines induisant une apoptose cellulaire qui pourrait être liée à une perturbation du contenu intracellulaire en calcium. La perturbation de la production d'énergie couplée à l'inhibition de l'activité de nombreuses enzymes est susceptible d'affecter toutes les fonctions cellulaires.

- **Béryllium**

C'est un métal gris-argenté de valence (+II). Le béryllium métal n'est pas soluble dans l'eau mais les sels tel que les chlorures, fluorures, nitrates, phosphates, sulfates de béryllium sont

hydrosolubles. Naturellement présent dans l'environnement (dans les roches, le charbon, le sol, les poussières volcaniques), il est utilisé du fait de ses propriétés dans la fabrication d'alliages béryllium et cuivre pour obtenir un alliage exceptionnellement dur et bon conducteur électrique et thermique ; alliages de béryllium avec aluminium, ou magnésium, ou nickel ou cobalt, ou chrome, utilisés pour les freins d'avion, des équipements de télévision, des prothèses dentaires.

Il existe des expositions professionnelles au béryllium dans des secteurs tels que la récupération et le recyclage de métaux provenant de déchets industriels (circuits imprimés, ordinateurs, ...). L'usinage, le décapage, la soudure (lorsque le béryllium se trouve dans l'électrode, le flux ou la tige), la raffinerie de métaux précieux sont autant d'opérations pouvant exposer au béryllium en milieu professionnel.

La population générale est exposée à des traces de béryllium par inhalation de l'air, la fumée de cigarette et l'ingestion d'eau potable et de nourriture contaminée. Une des principales sources d'émissions anthropiques dans l'environnement est la combustion du charbon qui libère des particules et des cendres volantes (contenant du béryllium) dans l'atmosphère (ATSDR, 2002).

L'intoxication chronique est responsable d'une atteinte pulmonaire nommée la béryllose. Il s'agit d'une réaction irritative, immuno-allergique. Le béryllium agissant comme un antigène, il entraîne le développement de lymphocytes T CD4⁺ spécifiques dans le sang et les poumons. Il est possible que l'exposition cutanée aux poussières entraîne une sensibilisation.

- **Cadmium**

Le cadmium est un métal blanc, argenté, présent en faible quantité dans les minerais tels que la greenockite (sulfure de cadmium), presque toujours associé à la sphalérite (sulfure de zinc). On le retrouve également dans les minerais de plomb et de cuivre ainsi que dans des phosphates naturels. Il est un sous-produit de la métallurgie du zinc, présente des propriétés similaires à ce dernier et se trouve essentiellement à l'état divalent. Le cadmium est utilisé dans la fabrication des batteries (en tant qu'électrode négative) avec des performances supérieures aux batteries au plomb. Certains colorants et pigments contiennent du cadmium et sont incorporés dans le PVC afin d'arrêter les réactions de dégradation. Le cadmium est une impureté présente dans les métaux non ferreux tels que le zinc, le plomb, et le cuivre.

En milieu professionnel, les métallurgistes sont exposés lors des opérations de fonte et de raffinage des minerais de sulfure de zinc. L'exposition excessive aux poussières et aux fumées

lors de la production du cadmium et de ses sels, la soudure et le découpage d'acier cadmié, la fabrication d'accumulateurs sont des sources potentielles d'intoxication.

L'exposition en population générale est liée au tabagisme et à l'alimentation. L'alimentation à travers les légumes, les céréales, (riz, graines de tournesol) est la principale source d'exposition pour les populations non fumeuses. Le poisson en contient seulement de petites quantités. Dans l'eau de boisson, la concentration est généralement inférieure à 1 µg/L sauf contamination liée à une mine, comme ce fut le cas au Japon avec la maladie « *Itai itai* » des populations vivant dans le bassin de la rivière Jinzu.

L'intoxication chronique se manifeste à travers des signes comme les dents jaunes cadmiques, les troubles respiratoires, rénaux (toxicité tubulaire proximale), osseux (en cas d'intoxication très avancée), le risque d'hypertension, une action cancérogène (objectivée par des données animales de perturbation des mécanismes de réparation de l'ADN) et troubles de la reproduction. Les mécanismes d'action toxiques sont donc divers. Une fois absorbé, le Cd a tendance à s'accumuler dans le foie et les reins. Majoritairement lié aux érythrocytes, il est fixé à l'hémoglobine dans le sang. L'ion Cd²⁺ se lie aux groupements anioniques avec une affinité particulière pour les groupements SH des protéines et autres biomolécules. Le cadmium et ses sels sont à la fois des irritants et des toxiques systémiques.

- **Chrome**

C'est un métal blanc-grisâtre, dur, qui existe sous plusieurs niveaux d'oxydation de (-II) à (+VI) mais principalement sous trois valences :

- Le Cr (0) : Métal et alliages relativement inerte et peu toxique à l'état métal,
- Le Cr (III) : C'est un élément trace essentiel (Composés chromiques),
- Le Cr (VI) : Mono et dichromates qui sont de puissants oxydants.

L'exposition professionnelle est retrouvée chez les travailleurs dans les industries métallurgiques, dans les minerais à forte teneur en chrome, et dans la fabrication de ferrochrome (alliage) destiné aux applications métallurgiques dans la production d'acier. Les aciers inoxydables sont des alliages de fer, de chrome (minimum 10,5 %) et de carbone (1,2 %) maximum. Ainsi, lors du soudage de métaux constitué d'alliages de chrome (selon la méthode utilisée) le travailleur peut être exposé. Dans l'industrie chimique, on retrouve des composés à base de chrome pour la préservation du bois, comme des teintures, des fongicides ou des pigments, tels que le chromate de plomb employé dans les peintures.

En population générale, l'exposition se fait via l'alimentation, l'inhalation de l'air ambiant, l'eau de boisson, et autres denrées alimentaires mises en conserves dans des boîtes non

laquées. Une exposition peut se produire également par le biais de prothèses, implants dentaires, pacemaker, suppléments vitaminiques.

Le Cr (VI) est considéré comme la forme toxique capable de pénétrer la cellule et non pas le Cr (III). L'exposition au Cr (VI) par inhalation, provoque inflammation et ulcérations. Il est susceptible de provoquer des cancers bronchiques et est classé dans le groupe des cancérigènes avérés chez l'homme. Toutefois, le Cr (III) et les intermédiaires réactionnels formés après réduction du Cr (VI) à l'intérieur de la cellule sont responsables d'une génotoxicité par liaison aux macromolécules et à l'ADN.

- **Plomb**

Le plomb est un métal d'aspect argenté brillant mais qui devient rapidement gris-bleu et terne lorsqu'il est au contact de l'air. Il existe dans deux états de valence : divalent et tétravalent. Le minerai le plus important est la galène, constitué de sulfure de plomb (PbS). D'autres éléments y sont associés tels que le zinc, l'antimoine, l'arsenic, le cuivre et l'argent.

L'exposition professionnelle est retrouvée :

- Au cours de l'extraction (à partir des minerais dans le cadre de la fonderie primaire ou à partir du recyclage de vieux métaux ou fonderie secondaire),
- Lors de la fabrication d'accumulateurs ou de batteries au plomb,
- Dans l'industrie du bâtiment et de la construction (barrières anti-bruit, recouvrement de toitures...),
- Le plomb fondu s'oxyde rapidement en surface, en présence d'air et une quantité importante de fines poussières d'oxyde de plomb est émise. La manipulation de plomb fondu ou d'alliages de plomb constitue donc une source potentielle d'exposition excessive,
- Il est utilisé pour la fabrication et l'utilisation de lests de pêche ou de rideaux, de plombs de chasse et munitions,
- Certaines soudures utilisent comme matière d'apport un alliage à bas point de fusion Pb-Sn (plomb-étain). Une soudure molle eutectique avec 38 % Pb et 62 % Sb (antimoine) fondant complètement à 183°C est employée dans l'élaboration de joints étroits entre les métaux dans les situations où une température relativement basse est exigée,
- Le plomb est retrouvé dans certaines peintures (céruse), vernis et émaux (poteries à base de plomb), et en verrerie et cristallerie (le plomb ajoute éclat, densité et brillance au verre), dans le gainage de câbles électriques,

- Les sels de plombs sont utilisés comme pigments et stabilisants dans l'industrie des matières plastiques.

L'exposition en population générale a été liée à sa présence dans les gaz d'échappement des automobiles, ce qui en fait un polluant de l'atmosphère et du sol. Le plomb atmosphérique pollue les sols et les cultures qui sont ensuite consommées par les animaux et les hommes. L'utilisation de canalisations en plomb peut être à l'origine de contamination de l'eau de boisson (limite de qualité < 10 µg/L (Directive n° 98/83/CE du 03/11/98 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine)). La consommation de gibier chassé avec des munitions en plomb, ou la consommation de vins (vignes traitées à l'arséniate de plomb) peuvent être d'autres sources à l'origine de l'ingestion de plomb.

Le plomb dans l'organisme interfère avec un grand nombre de processus biochimiques du fait de sa similarité avec certains cations divalents essentiels. Il interagit avec des protéines enzymatiques ou non perturbant ainsi l'homéostasie calcique et les processus cellulaires médiés par le calcium (canaux ioniques ATPase-Ca⁺⁺). On peut citer les mécanismes d'action toxique suivants :

- Interaction avec les protéines (liaison avec les groupements sulfhydriles, les groupements amines et phosphate)
- Perturbation de la synthèse de l'hème (en se substituant à l'ion Zn⁺⁺ au niveau des sites actifs des groupements SH (sulfhydriles) des zinc métallo-enzymes). Les conséquences biologiques découlant de cette perturbation sont l'augmentation du taux d'aminolévulinate déshydratase (ALA-D) dans le sang et dans les urines ; l'augmentation de la concentration de coproporphyrinogène III et protoporphyrine IX dans les hématies, de coproporphyrine III, de porphobilinogène, d'uroporphyrine I et de coproporphyrine I dans les urines ; l'augmentation du fer sérique et la diminution de la synthèse de l'hème,
- Perturbation du rôle des protéines de zinc dans la régulation de l'expression des gènes,
- Perturbation de l'homéostasie calcique par son affinité plus importante que le calcium pour la protéine kinase C et la calmoduline (altérant ainsi les mécanismes de signalisation cellulaire),
- Stress oxydatif cellulaire provoqué par une augmentation de la production d'espèces réactionnelles de l'oxygène.
- **Mercur** (Medeiros et al., 1997; Dehon et al., 2001)

Le mercure est un métal liquide à température ordinaire. Le méthylmercure provient de la transformation des ions mercure qui subissent une méthylation enzymatique dans divers systèmes bactériens ou autres organismes vivant dans les eaux. Les composés méthyl

mercuriques sont les plus toxiques du fait de leur grande liposolubilité et de leur tendance à se concentrer dans les tissus en particulier dans le cerveau. Ces dérivés organiques sont absorbés par voie digestive (pour plus de 90 %) mais aussi pulmonaire et cutanée avec une élimination par voie biliaire et fécale (1/2 vie d'élimination d'environ 70 jours) ou plus faiblement par voie urinaire. Le mercure minéral, quant à lui, sous forme ionisée, est un agent thiolooprive puissant, perturbant le fonctionnement cellulaire avec des atteintes rénales et cérébrales. Ces dérivés minéraux se fixent sur les hématies et l'albumine plasmatique à parties égales et sont stockés majoritairement dans le rein. L'élimination se fait par voie rénale et fécale, faiblement par la sueur, la salive et les phanères. La demi-vie d'élimination du mercure sanguin est de 3 à 30 jours. Les principales formes chimiques de l'exposition au mercure comprennent le mercure élémentaire (Hg^0), le mercure divalent (Hg^{2+}) et le mercure organique (principalement sous forme de méthylmercure, MeHg).

Du fait de ses propriétés physico-chimiques, le mercure a été longtemps utilisé et a été de ce fait à l'origine d'intoxications humaines. Mais ce métal n'a pas disparu pour autant de notre quotidien car on le trouve encore dans les amalgames dentaires, plus connus sous le nom de plombages et dans les ampoules fluorescentes à basse consommation d'énergie. Les amalgames dentaires sont la principale source de mercure inorganique pour la population générale. L'apport quotidien qui leur est attribué est augmenté par la consommation fréquente de chewing-gum qui facilite la libération de mercure par les amalgames. On le retrouve également dans l'industrie sous sa forme métallique ou sous forme de dérivés inorganiques ou organiques. Dans la population générale, les concentrations sanguine et capillaire du métal sont corrélées à la consommation de poisson. L'exemple le plus connu de ce type de toxicité est celui de la « Maladie de Minamata » qui a affecté une population de pêcheurs de cette baie du Japon. La consommation régulière de poisson contaminé détermine une symptomatologie essentiellement nerveuse, à type d'encéphalopathie. Chez l'adulte, des effets neurotoxiques ont été décelés quand elle dépasse 200 $\mu g/L$ de sang (Institut de veille sanitaire (France), 2011). La concentration du mercure dans le sang total est un indicateur de l'exposition au mercure organique, mais elle rend surtout compte de l'exposition récente. Le principal organe cible du mercure organique est le système nerveux central. Il est tératogène. Les populations les plus à risque, en raison de ces effets, sont les enfants en bas âge et les femmes enceintes et allaitantes. L'utilisation du mercure dans l'exploitation artisanale aurifère de certains pays ou territoires comme l'Indonésie, la Mongolie, les Philippines, la Tanzanie, le Zimbabwe et la Guyane est à l'origine d'intoxications (Baeuml et al., 2011).

I.2.1.2. Matrices biologiques pour le dosage des ETM

Le sang et l'urine sont les matrices les plus utilisées dans le cadre des études de surveillance biologique. On retrouve aussi des matrices non conventionnelles telles que les cheveux, la salive, le placenta, le méconium, les ongles, les dents et le lait maternel (voir tableau 11). Le choix de la matrice varie selon la toxicocinétique, le métabolisme du polluant, le moment du prélèvement (début de poste ou fin de poste / début de semaine ou fin de semaine), ainsi que de la disponibilité de valeurs de référence. Le choix de l'indicateur est conditionné par la faisabilité des analyses.

- **Sang**

C'est la matrice traditionnellement utilisée pour les études de surveillance biologique humaine. Les procédures pour le prélèvement sanguin sont normalisées. Il s'agit d'un échantillonnage invasif pouvant être à l'origine de réticence de la part des personnes à prélever. Les éléments métalliques sanguins sont distribués entre les compartiments intra érythrocytaires et extracellulaires (plasma, sérum) avec différentes affinités pour ces compartiments en fonction de leurs propriétés chimiques. Par exemple en cas d'exposition récente, 90 % du plomb est intra érythrocytaire. De plus l'utilisation accrue du plomb sanguin comme indicateur dans les études cliniques et épidémiologiques sur l'exposition humaine au plomb font de cette matrice, l'élément clé de comparaison par rapport à l'utilisation d'autres matrices biologiques (Gil et Hernández, 2015). Les problèmes de contamination de l'échantillon au moment du prélèvement, pendant sa conservation, et lors de la préparation sont les difficultés majeures liées à l'utilisation de ce type de matrice.

- **Urine**

Elle permet généralement d'obtenir des informations en cas d'exposition récente et n'est donc pas la matrice la mieux adaptée pour un suivi dans le cadre d'une exposition chronique. Pour les métaux ayant une longue demi-vie comme le cadmium, la matrice urine est adaptée. Chez l'adulte, la concentration urinaire de cadmium est corrélée à la charge rénale (surtout en cas d'atteinte rénale) et donc à l'exposition chronique. De plus, l'utilisation de l'urine est préférée dans plusieurs enquêtes de surveillance biologique compte tenu du fait qu'il ne s'agit pas d'une méthode invasive comme c'est le cas du prélèvement sanguin (NHANES, GerEs). En population générale, puisque l'exposition aux éléments traces métalliques est sensée être faible et relativement uniforme dans le temps, la surveillance biologique dans la matrice urinaire est un bon reflet de l'exposition (Gil et Hernández, 2015). Toutefois cette matrice présente des exigences et difficultés lors de l'interprétation :

- Les urines doivent être prélevées à un moment précis de la journée, ou sur toute la journée (urines de 24 h),
- La concentration urinaire de certains éléments est modifiée en fonction de l'alimentation récente (72 h) et la diurèse nécessite d'ajuster la concentration de biomarqueur (arsenic, cadmium...) sur la concentration urinaire de créatinine,
- En cas de prélèvement à un moment précis de la journée, les variabilités inter et intra-individuelles de la créatinine conduisent parfois le biologiste à mettre en place un critère d'exclusion médicale ou biologique (créatinine non comprise entre 0,3 et 3 g/L).

I.2.2. Détermination analytique des ETM

La Biotoxicologie, terme composé du préfixe Bio (Biologie) et de Toxicologie est une discipline scientifique qui étudie les toxiques, leurs propriétés, leur devenir dans l'organisme, leur mode d'action, leur recherche dans différents milieux et des moyens (préventifs et curatifs) permettant de combattre leur nocivité. L'exposition aux polluants environnementaux tels que les ETM, se produit par différentes voies d'absorption, telles que l'inhalation, l'ingestion, et la pénétration par voie cutanée. La biosurveillance humaine (HBM ou Human Biomonitoring) encore appelée surveillance biotoxicologique prend en compte toutes les voies d'absorption et autres facteurs modulant l'absorption, en mesurant les concentrations internes d'un produit chimique ou de ses métabolites dans des matrices biologiques humaines (World Health Organization, Regional Office for Europe, 2015).

Les méthodes d'analyse pour la détection de substances ETM dans les milieux biologiques se sont considérablement améliorées ces dernières décennies avec des limites de détection plus basses et des mesures plus précises et spécifiques (Knudsen et Merlo, 2011). C'est ainsi que la mesure des concentrations biologiques en éléments traces métalliques a connu des progrès importants avec l'avènement de l'ICP-MS.

Tableau 11 : Signification toxicologique et utilisation des différentes matrices biologiques dans le cadre de la surveillance biologique humaine des éléments traces métalliques
(Michalke et al., 2014; Gil et Hernández, 2015; World Health Organization, Regional Office for Europe, 2015)

Échantillons biologiques utilisés	Signification toxicologique	Avantages	Limites / précautions
Sang	En cas d'exposition récente (excepté le Me Hg)	Compartiment central en équilibre avec les organes et les tissus	Matrice complexe (lipides, protéines, cellules)
	<u>Plombémie</u> : bon indicateur si exposition stable ; sous-estime à distance de l'intoxication ; surévalue dans les jours qui suivent une forte exposition	Procédure d'échantillonnage standardisée	Technique invasive (enfants) Interférences (anticoagulants) Conditions spéciales de transport et de conservation
Urines	Exposition récente (excepté pour le Cd) Intéressant pour les spéciations chimiques (As, Hg)	Matrice biologique non invasive (enfants)	Matrice complexe Tubes en PET prétraités avec HNO ₃ Interférences (alimentation-/ As, Hg) dans le poisson) Normalisé en Fonction de la concentration urinaire de créatinine Conditions spéciales de transport et de conservation
	Exposition chronique (période croissance des cheveux) permettant d'avoir une idée sur l'exposition du mois précédent.	Non invasive Facilement accessible Matrice stable (enfants)	Exposition environnementale d'où la contamination externe Traitement appliqué aux cheveux Phase de lavage indispensable Facteurs de confusion (âge, sexe, couleur, soins capillaires, Analyse limitée à certains éléments traces spécifiques afin de corrélér avec la dose interne (As, Hg)
Salive	Exposition chronique ou relargage : Sans mastication ou après mastication d'un chewing-gum sur les plombages (Hg, cuivre, zinc, étain, argent)	Matrice biologique non invasive Collecte facile	Faibles concentrations d'analytes par rapport au sang Nécessite des méthodes analytiques sensibles Peu documenté Variation en termes de composition et de volume Limités aux produits volatiles Risque d'Interférence avec les tampons d'absorption

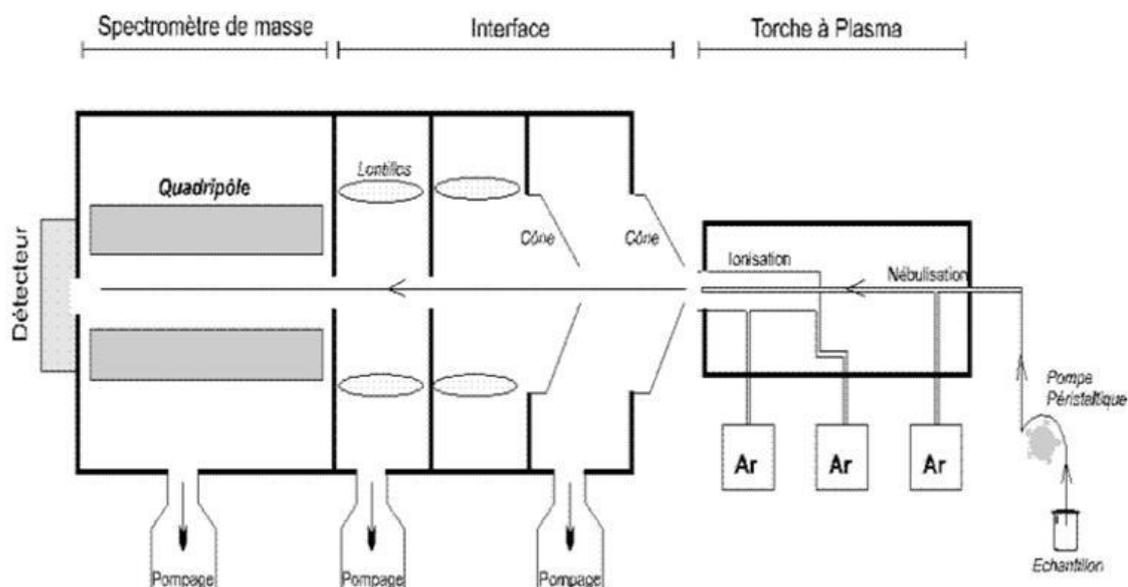
Échantillons biologiques utilisés	Signification toxicologique	Avantages	Limites / précautions
Placenta	Transfert placentaire de la mère à l'enfant	Matrice biologique non invasive	Limité à une certaine période de vie
Méconium	Spécifique et correspondant à l'évaluation d'une exposition cumulative pré natale aux éléments traces métalliques (durant les 12-40 semaines de gestation)	Meilleure sensibilité analytique par rapport à l'urine et le sang de cordon Meilleur indicateur de l'exposition chimique du fœtus durant la gestation	Seulement possible à la naissance
Ongles	Exposition chronique Période de croissance	Ne nécessite pas des conditions spécifiques de conservation	Influencé par les paramètres environnementaux, style de vie et nutritionnels (amalgames dentaires, cigarettes, poissons) Pas de valeur de référence établie
Dents	Exposition chronique- enfants en période de croissance	Méthode non invasive En cas de dentition et perte de dents	Pas de valeur de référence établie
Lait maternel humain	Indicateur d'une exposition environnementale prénatale	Matrice biologique non invasive	Influencé par les habitudes alimentaires Niveau plus bas que celui retrouvé dans le sang

I.2.2.1. Analyse par ICP-MS (Plasma Induit Couplé à la Spectrométrie de Masse) :

Cette méthode repose sur le principe que l'échantillon sanguin (dilué) à doser est pompé et subit successivement une nébulisation, une ionisation et les ions formés sont séparés en fonction de leur rapport (m/z) avant d'être détectés (voir figure 6).

Figure 6 : Appareillage et principe de l'ICP-MS

Source : (Nanosciences et Innovation pour les Matériaux la Biomédecine, 2016)



Le couplage plasma induit par haute fréquence – spectrométrie de masse est actuellement la méthode analytique la plus sensible pour l'analyse inorganique en biologie clinique, du fait de ses limites de détection comprise entre 1 ppt (partie par trillions) et quelques parties par billions (ppb). La source d'ionisation des éléments dans cet équipement est le plasma. Outre ses excellentes précisions et sensibilités, les caractéristiques de l'ICP-MS sont de présenter une capacité multi-élémentaire, un niveau de sensibilité et une gamme linéaire beaucoup plus importante que la majorité des techniques utilisées en biologie médicale. Dans cette méthode, l'échantillon (sang dilué au 1/50^{ème} par exemple) est amené par une pompe péristaltique jusqu'au nébuliseur puis atomisé au niveau d'une torche à plasma. Le plasma généré à très haute température (8000 K) dans un gaz chimiquement inerte tel que l'argon permet de réaliser l'atomisation et l'ionisation de l'échantillon. Du fait de l'utilisation de l'argon (énergie d'ionisation élevée de 15,76 eV) la plupart des éléments métalliques et métalloïdiques sont alors ionisés à plus de 90 %. Seuls quelques éléments à haute énergie d'ionisation ne sont que partiellement ionisés (C, N, O, S, halogènes,). Les cations sont focalisés vers le quadripôle du spectromètre de masse dans lequel ils seront séparés en fonction de leur rapport m/z. Un détecteur permet enfin de quantifier l'intensité du signal pour chaque masse.

En plus de la détermination des ETM, l'ICP-MS permet d'obtenir des informations sur la composition isotopique des éléments. La précision de ratio des isotopes mesurés est de l'ordre de 0,2 %. Il est ainsi possible de tracer l'origine d'une contamination par le plomb à partir de la seule connaissance des rapports isotopiques de cet élément.

- **Interférences** (Massaro, 1997; Darrouzes, 2007)

L'ICP-MS est une technique d'analyse multi élémentaire permettant d'analyser l'ensemble du tableau périodique (excepté quelques éléments comme C, N, O, F et les gaz rares) en quelques minutes. Elle présente toutefois des interférences qui peuvent être d'origine non spectroscopique ou spectroscopique.

Les interférences non spectroscopiques sont liées à la viscosité de la matrice et aux effets de charge. Ce sont des difficultés liées à l'analyse de certains échantillons dont la matrice est dite chargée (sang, urine).

Les interférences spectroscopiques quant à elles proviennent de la combinaison d'ions provenant du plasma, du système d'introduction de l'échantillon et de la matrice. Elles sont généralement divisées en quatre catégories : les interférences isobariques, les interférences dites de double charge, les interférences dites d'oxydes et les interférences polyatomiques.

- Les interférences isobariques

Les interférences isobariques sont liées au fait que différents ETM possèdent des isotopes ayant une même masse (exemple : Interférence entre le ^{64}Cu et ^{64}Zn).

- Les interférences dites de double charge

Un élément qui possède un potentiel de deuxième ionisation faible peut s'ioniser deux fois, par exemple : la création d'ions $^{138}\text{Ba}^{2+}$ génère une interférence au rapport masse sur charge 69, correspondant à l'isotope majoritaire du gallium.

- Les interférences d'oxydes

Les oxydes représentent des interférences courantes car les liaisons oxygène-métal sont particulièrement stables. Ainsi, $(^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}^+)$ peut également interférer avec les mesures de $(^{56}\text{Fe}^+)$.

- Les interférences polyatomiques

Elles sont liées à la formation d'un complexe ou association d'un ou plusieurs éléments ayant alors une masse équivalente à un élément recherché. Des exemples typiques d'interférences polyatomiques sont ceux causés par le complexe argon-carbone ($^{40}\text{Ar}^{12}\text{C}$) sur le chrome (^{52}Cr) ; argon-oxygène ($^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$) sur le fer (^{56}Fe) ; argon-chlore ($^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$) sur l'arsenic (^{75}As) ; ou l'argon diatomique ($^{40}\text{Ar}_2$) sur le sélénium (^{80}Se).

« En effet, la quantification du chrome dans le sang et les urines est particulièrement délicate car les concentrations sont très faibles, inférieures à 1 µg/L dans un milieu biologique riche en carbone. Or, le carbone, de masse atomique 12, se combine au gaz vecteur, l'argon, dont la masse atomique est 40, pour donner naissance à une interférence polyatomique dont la masse

est 52, précisément celle du chrome ; masse qui correspond à l'isotope 52, le plus abondant de l'élément ($^{52}\text{Cr} = 84 \%$, $^{53}\text{Cr} = 10 \%$, $^{50}\text{Cr} = 4 \%$, $^{54}\text{Cr} = 2 \%$), sur lequel la mesure s'impose compte tenu des faibles concentrations à mesurer. L'emploi d'une cellule de collision réaction (CCR) dans laquelle on introduit un mélange de gaz réactionnels permet de casser cette interférence polyatomique » (Goullé et al., 2011). Cette méthode analytique nécessite la mise au point de paramètres d'optimisation qui sont décrits dans l'article de Bonnefoy (Bonnefoy et al., 2005).

Les interférents polyatomiques potentiels pour les éléments compris entre les masses 50 et 80, gamme de masse particulièrement sujette à ces interférences sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Interférents potentiels pour les masses entre 50 et 80

Analyte	Interférents potentiels
^{51}V	$^{35}\text{Cl}^{16}\text{O}$, $^{37}\text{Cl}^{14}\text{N}$
^{52}Cr	$^{36}\text{Ar}^{16}\text{O}$, $^{40}\text{Ar}^{12}\text{C}$, $^{35}\text{Cl}^{16}\text{OH}$, $^{37}\text{Cl}^{14}\text{NH}$
^{53}Cr	$^{36}\text{Ar}^{16}\text{OH}$, $^{40}\text{Ar}^{13}\text{C}$, $^{37}\text{Cl}^{16}\text{O}$, $^{35}\text{Cl}^{18}\text{O}$, $^{40}\text{Ar}^{12}\text{CH}$
^{55}Mn	$^{37}\text{Cl}^{18}\text{O}$
^{56}Fe	$^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$, $^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}$
^{57}Fe	$^{40}\text{Ar}^{16}\text{OH}$, $^{40}\text{Ca}^{16}\text{OH}$
^{60}Ni	$^{44}\text{Ar}^{16}\text{O}$, $^{44}\text{Ca}^{16}\text{O}$
^{63}Cu	$^{40}\text{Ar}^{23}\text{Na}$, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{35}\text{Cl}$, $^{12}\text{C}^{14}\text{N}^{37}\text{Cl}$
^{64}Zn	$^{32}\text{S}^{16}\text{O}_2$, $^{32}\text{S}_2$
^{65}Cu	$^{32}\text{S}^{16}\text{O}_2\text{H}$, $^{32}\text{S}_2\text{H}$, $^{40}\text{Ar}^{25}\text{Mg}$
^{66}Zn	$^{34}\text{S}^{16}\text{O}_2$, $^{32}\text{S}^{34}\text{S}$
^{68}Zn	$^{32}\text{S}^{18}\text{O}_2$, $^{34}\text{S}_2$
^{72}Ge	$^{40}\text{Ar}^{32}\text{S}$, $^{35}\text{Cl}^{37}\text{Cl}$
^{75}As	$^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$, $^{40}\text{Ca}^{35}\text{Cl}$
^{77}Se	$^{40}\text{Ar}^{37}\text{Cl}$, $^{40}\text{Ca}^{37}\text{Cl}$
^{78}Se	$^{40}\text{Ar}^{38}\text{Ar}$

L'utilisation d'une chambre de collision ou de réaction vise à éliminer ces interférences polyatomiques. Il s'agit de dispositifs utilisant un second multipole placé avant le quadripole analyseur et alimentés par un ou plusieurs gaz. La suppression des interférences polyatomiques est basée sur deux principes qui consistent :

- soit à modifier ou à détruire l'interférence par un mécanisme collisionnel pour les chambres de collision (Paucot, 2007). Le gaz utilisé est alors non-réactif (Hélium, Argon, Xénon...) et tente d'éliminer l'ion polyatomique interférent par simple collision.

- soit à modifier ou à détruire l'interférence par réaction avec un gaz réactif tel que l'ammoniac ou l'oxygène introduit à faible débit dans la chambre de réaction (Paucot, 2007).

Les dispositifs de collision entraînent toutefois des pertes de sensibilité pour les analytes et les deux dispositifs peuvent générer l'apparition de réactions parasites, ainsi qu'un surcoût pour l'appareillage.

Il est également possible de limiter ces interférences par le choix d'un autre isotope non interféré (cas du choix isotopique du ^{82}Se). L'abondance isotopique étant généralement inférieure, la sensibilité c'est-à-dire le rapport de l'intensité du signal à la concentration, s'en trouve dégradée. En outre, cette issue n'est possible que pour des éléments non mono isotopiques et ne convient donc pas entre autres pour le béryllium, l'aluminium, le manganèse, le cobalt, l'arsenic, l'iode, ou le bismuth (Bonney, 2005).

« L'isotope le plus abondant ^{80}Se (49,82 %) présente le même rapport que le dimère $^{40}\text{Ar}^{40}\text{Ar}$. Pour des raisons thermodynamiques de cinétiques réactionnelles, la levée de cette interférence ne peut être réalisée par l'utilisation de la DRC avec l'ammoniac. L'isotope 77 (7,58 %) est interféré par l'ion polyatomique $^{40}\text{Ar}^{37}\text{Cl}^+$ dont la probabilité d'existence est importante dans les liquides biologiques. Ainsi le dosage du sélénium sérique que nous avons développé est-il effectué sur l'isotope ^{82}Se (9,19 %) » (Moesch, 2007).

- **Instrumentation :**

Les appareils ICP-MS peuvent ainsi être munis d'une chambre de collision (CCT^{ED} chez Thermo Electron Corporation), d'une chambre de réaction dynamique (Elan 6100 DRC chez PerkinElmerSciex), voire d'une cellule de collision associée à une véritable cellule de réaction quadripolaire (UCT pour Universal Cell Technology pour l'ICP-MS NexION 350D de PerkinElmer) (Figure 7). Dans ce dernier cas, l'appareil peut bénéficier des trois modes de fonctionnement différents, en fonction des niveaux requis d'élimination des interférences et de limites de détection.

Figure 7 : Appareil ICP-MS NexION 350 D utilisé au laboratoire du CHU de Limoges



I.2.2.2. Autres méthodes d'analyses des éléments traces métalliques

Les autres méthodes électrochimiques et optiques les plus utilisées pour le dosage des ETM sont résumées dans le tableau 13.

- Spectrométrie d'absorption atomique en flamme

L'analyse se base sur l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental. Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnelle au nombre d'atomes d'élément absorbant (selon la loi de distribution de Boltzmann), elle permet de mesurer les concentrations des éléments à doser.

- Spectrométrie d'absorption atomique en four graphite

Dans un appareil d'absorption atomique à four graphite, l'échantillon aqueux est placé dans un four électrique comportant un tube de graphite qui fait office de résistance chauffante par effet Joule. L'élément est ainsi volatilisé sous forme d'un gaz atomique et placé par un gaz vecteur (de l'argon) sur le parcours optique de l'appareil. La concentration en élément est déduite de la mesure de l'absorbance de la lumière par les atomes.

- Spectrométrie d'émission atomique couplée à un plasma induit ICP-AES

L'analyse de métaux par ICP-AES repose sur la spectrométrie d'émission atomique. « L'excitation correspond à l'absorption d'une quantité d'énergie par l'atome suite à la collision de cet atome avec une autre particule. Cette quantité d'énergie absorbée entraîne le déplacement d'un électron de l'atome vers un niveau d'énergie supérieure. L'atome est alors dit « excité ». Par contre, un atome excité est instable. Il va donc fondamentalement par une ou

plusieurs transition(s) électronique(s) d'un état d'un niveau énergétique supérieur à un état énergétique inférieur. La transition électronique d'un état d'un niveau énergétique supérieur à un état énergétique inférieur conduit à l'émission d'un photon ayant une énergie correspondant à la différence d'énergie entre les deux niveaux énergétiques. Il s'agit de l'émission. L'énergie des photons est spécifique de l'élément et de la transition concernée ».

- Fluorescence X

La fluorescence des rayons X (XRF) est une technique non destructrice qui sert à quantifier la composition élémentaire des échantillons solides et liquides. On utilise les rayons X pour exciter les atomes qui sont dans l'échantillon, ce qui leur fait émettre des rayons X à énergie caractéristique de chaque élément présent. L'intensité et l'énergie de ces rayons X sont ensuite mesurées.(Cesareo et Viezzoli, 1983)

- Activation neutronique

Elle consiste à irradier l'échantillon à analyser dans un flux de particules appropriées, neutrons, particules chargées... et à identifier, ensuite, après irradiation, les isotopes radioactifs créés à partir des éléments à doser. L'excitation concerne le noyau de l'atome et les mesures portent sur les isotopes radioactifs artificiels ainsi créés. Méthode non destructrice donc applicable à l'analyse in vivo et basée sur l'excitation , de plus, après l'irradiation de l'échantillon par le flux de neutrons, le risque de contamination est inexistant.(Bonnefoy, 2005)

- Méthodes électrochimiques :

Ces méthodes sont basées sur des réactions d'oxydoréductions ou sur des méthodes potentiométriques, fondées sur la mesure d'un potentiel électrochimique d'une solution en l'absence de courant électrique. La concentration en ions est alors obtenue en fonction du potentiel mesuré à une électrode à membrane spécifique à chaque ion.

Tableau 13 : Principales méthodes utilisées pour l'analyse des éléments traces métalliques
(Draghici et al., 2011)

Technique	Principe	Type d'analyse	Utilisation
SAA (Spectrométrie d'absorption atomique) (Flamme et four graphite)	L'absorption de l'énergie rayonnante produite par une source de rayonnement spécifique, par des atomes dans leur état électronique fondamental	- élément unique - Analyse multi élémentaire (2 à 6 éléments)	Largement utilisé
ICP- AES Spectroscopie d'émission atomique couplée à un plasma induit	Mesure de l'émission optique des atomes excités	Analyse simultanée multi élémentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Largement utilisé • Ne permet pas une détermination isotopique
Spectroscopie de fluorescence atomique	Mesure la lumière ré émise après absorption	1 élément	Mercure, arsenic, sélénium Méthode complémentaire à la SAA
Fluorescence X	Rayons X comme source primaire d'excitation Les éléments émettent ensuite des rayons X caractéristiques à une longueur d'onde donnée	Détermination simultanée de plusieurs éléments	Plusieurs éléments peuvent être déterminés Méthode très sensible
Analyse par Activation Neutronique (NAA)	Conversion atomique de radio nucléides stables en atome radioactifs	Détermination simultanée de plusieurs éléments	Plusieurs éléments peuvent être déterminés Méthode très sensible
Méthodes électrochimiques	Polarographie Potentiométrie Voltamétrie	Analyse consécutive de différents ions métalliques	Adaptées pour les métaux de transition et métalloïdes (dosage de charge totale ou spéciation)

I.2.3. La surveillance des expositions professionnelles

L'exposition humaine aux ETM peut se produire en milieu professionnel ou en population générale par le biais de l'environnement et de l'alimentation, entraînant pour certains d'entre eux des effets toxiques à long terme liés à leur potentiel cumulatif. Comme le montre la figure 8, trois stratégies peuvent être adoptées :

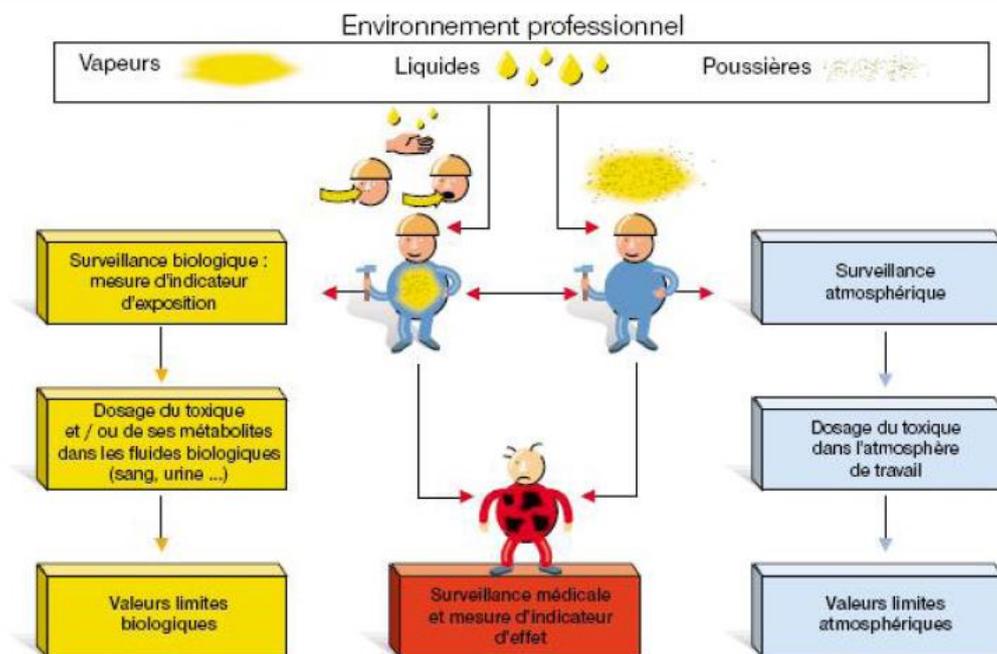
- La surveillance de l'environnement avec les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLCT et VME),

- La surveillance biologique de l'exposition, élément déterminant dans la protection de l'homme,
- La surveillance médicale et la mesure des indicateurs d'effets.

La protection et la prévention passent essentiellement par les deux premières stratégies qui vont consister à faire des mesures au niveau de l'atmosphère de travail et à rechercher les niveaux biologiques des toxiques dans l'organisme.

Figure 8 : Place de la surveillance biotoxicologique en milieu professionnel

(Source : INRS, Travail & Sécurité, n°11 ; 1997)



I.2.3.1. Mesurages atmosphériques en milieu de travail (Dehon et al., 2001)

L'objectif principal de la surveillance atmosphérique de l'exposition est la comparaison avec les valeurs limites d'exposition professionnelle (lorsqu'elles existent) afin de réduire le plus possible l'exposition lorsque celle-ci fait partie de l'activité.

Les étapes principales de l'évaluation de l'exposition au poste de travail sont (INRS, 2005) :

- La détermination des substances toxiques utilisées au poste,
- La détermination des impuretés éventuelles, des produits de réaction ou de dégradation résultant de leur utilisation dans le processus,

- L'identification des groupes d'exposition homogène GEH. « *Un GEH se définit par une situation d'exposition professionnelle à un risque défini en relation avec une série de tâches bien identifiées et à priori reproductibles* »,
- La hiérarchisation des risques afin de déterminer les priorités d'action en fonction du danger et des quantités manipulées. Pour cela, il faut déterminer le danger et la valeur limite d'exposition réglementaire pour chaque agent chimique à mesurer.

Le mesurage atmosphérique peut se réaliser par le biais de prélèvements en ambiance ou de prélèvements individuels. Il importe de définir la stratégie de mesurage, en tenant compte du fait que le prélèvement individuel est à prioriser chaque fois que possible lorsque l'objectif est d'évaluer une exposition, car il prend en compte le déplacement dans l'atelier et le geste professionnel. La durée de prélèvement est conditionnée par le type de limite d'exposition auquel sera comparé le résultat (VME : Valeur Moyenne d'Exposition ou VLCT : Valeur Limite d'Exposition à Court Terme).

- **La VLCT**

Anciennement désignée par le terme VLE (Valeur Limite d'Exposition), la Valeur Limite d'Exposition à Court Terme (VLCT) correspond à un pic d'exposition sur une durée de 15 minutes quelle que soit la durée de l'évènement polluant. Toutefois, il est recommandé si possible de déterminer la durée de l'évènement polluant afin de limiter le prélèvement à cette durée pour ne pas diluer la valeur réelle de la concentration mesurée sur des temps supérieurs à l'évènement polluant.

- **La VME**

Elle correspond à un prélèvement unique pendant la totalité d'un poste de travail (8h), ou sur une fraction importante de celui-ci. Elle peut également se mesurer à travers une série de prélèvements consécutifs (au moins 6 mesurages) par GEH à répartir sur plusieurs jours. Cette méthode permet alors de tenir compte non seulement des fluctuations dans un même GEH mais également de la dispersion des résultats d'un jour à l'autre. En absence d'un nombre suffisant de données permettant de prendre en compte ces variations, il est possible d'effectuer une évaluation basée sur l'écart des résultats d'exposition avec la VME rendant nécessaire la mise en place de mesures de prévention lorsque le résultat d'exposition dépasse 0,3 VME.

Dans le cadre de la surveillance de l'exposition proposée par les hygiénistes du travail et les spécialistes en santé environnementale, il est possible de prévenir l'exposition à travers des activités régulières de surveillance de l'atmosphère. Cette démarche fait **partie intégrante**

de la prévention primaire en identifiant et quantifiant l'exposition avant l'apparition de phénomènes pathologiques.

Les valeurs limites d'exposition professionnelles sont déterminées en fixant des limites pour une exposition par inhalation à un polluant chimique, afin que cette exposition, même régulière n'entraîne à aucun moment des effets néfastes pour la santé des travailleurs. Cependant le respect des VLEP n'implique pas l'absence de risque car seule la voie d'inhalation est prise en compte et l'évolution de l'état des connaissances est constamment en évolution. Selon l'INRS : « *Bien que les mesures de prévention techniques, collectives, individuelles ou organisationnelles permettent de réduire de façon appréciable les expositions professionnelles au risque chimique et leurs effets sur la santé, il est nécessaire de mettre en place un suivi médical (clinique et biologique) pour un **dépistage précoce** des anomalies de santé et l'évaluation des interactions santé / travail* ».

I.2.3.2. Biométrie

La surveillance biologique peut être réalisée à travers deux démarches : la surveillance de l'exposition et la surveillance de l'effet induit, reposant respectivement sur des indicateurs de dose interne et des indicateurs d'effet. La surveillance biologique de l'exposition désigne l'identification et la mesure des substances de l'environnement du poste de travail ou de leurs métabolites, dans les fluides biologiques, les tissus, les excréments, les sécrétions ou l'air expiré des salariés exposés, afin d'évaluer l'exposition réelle et le risque pour la santé de chacun d'entre eux, par comparaison à des références appropriées (Berlin et al., 1984).

La surveillance biologique présente un intérêt particulier pour évaluer des expositions (INRS, 2015) :

- À des substances faiblement volatiles ou à pénétration cutanée significative (comme les amines aromatiques),
- À des substances ayant des effets toxiques synergiques, additifs ou antagonistes,
- Dans des situations où la mesure des concentrations atmosphériques n'est pas adaptée (du fait du port de protections individuelles, par exemple) ou difficilement réalisable (travail en espaces confinés, déplacements fréquents...). C'est une méthode qui ne peut être utilisée dans les cas de substances responsables d'effets locaux, irritatifs, allergiques.

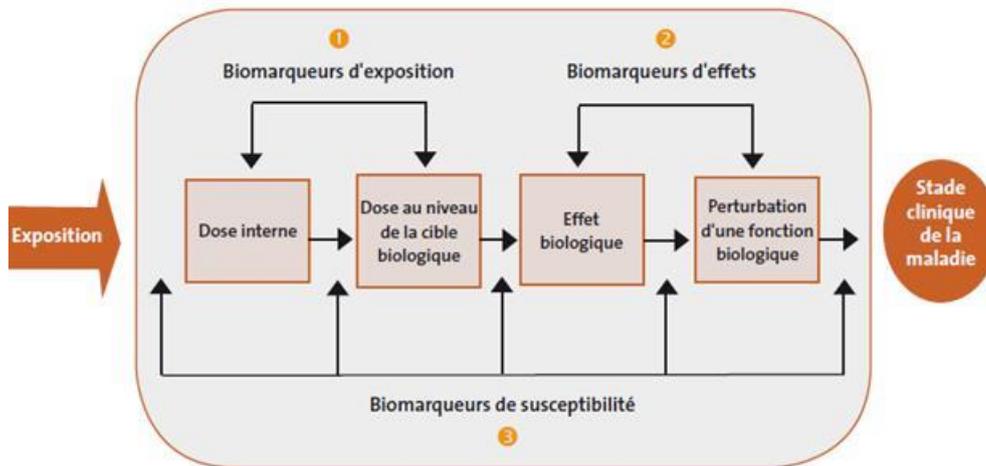
Elle est cependant inadaptée à la surveillance des effets de pics d'exposition.

Les limites liées à la biométrie (Lauwerys et Hoet, 2001) :

- Le mécanisme d'action et /ou la toxicocinétique du produit doivent être connus pour le choix de la matrice biologique et du moment du prélèvement (nombre limité de substances).
- Elle permet d'évaluer l'intensité de l'exposition sans permettre d'investiguer le risque sur la santé en ce qui concerne les substances n'ayant pas une relation proportionnelle entre l'exposition, la dose interne et les effets biologiques.
- La méthode est non applicable aux substances entraînant des effets locaux ou exerçant leur effet toxique sur le site de premier contact (peau, œil, poumons...).
- Elle nécessite l'utilisation de méthodes d'analyse sensibles et spécifiques.
- La méthode est non indiquée pour la quantification de contaminants lors de pics d'exposition.
- Elle ne permet pas d'identifier les sources d'exposition ni en général les voies de pénétration.
- Il s'agit de méthodes parfois invasives (prises de sang) et nécessitant des précautions en ce qui concerne le pré-analytique afin d'éviter les contaminations et / ou la dégradation de l'élément recherché.

Les indicateurs biologiques d'exposition (IBE) rendent compte de la quantité du produit ou de ses métabolites dans les matrices biologiques, reflétant ainsi la dose interne de la substance chimique concernée. Les substances ainsi dosées sont appelées "biomarqueurs" (voir figure 9). La plupart des biomarqueurs utilisés en biosurveillance humaine sont des biomarqueurs d'exposition, c'est-à-dire des polluants ou des métabolites de polluants mesurés en milieu biologique.

Figure 9 : Les différents marqueurs utilisés en biosurveillance humaine (Vicens, 2015)



L'utilisation de biomarqueurs d'effets est plus rare et il est exceptionnel qu'on s'intéresse à des biomarqueurs de susceptibilité dans un but de surveillance.

Un biomarqueur d'effets désigne une altération biochimique, physiologique, comportementale ou autre, mesurable dans un organisme, qui selon son ampleur peut être reconnue comme étant associée à une atteinte confirmée ou possible de l'état de santé ou à une maladie (World Health Organization, 2001). Il est également désigné comme un indicateur biologique d'effet pour la quantification d'une réponse de l'organisme face à un agent chimique toxique (mécanismes d'adaptation et de compensation). Le paramètre mesuré est alors appelé biomarqueur d'effet. C'est le cas par exemple de la mesure des PPZ (Proto Porphyrine Zinc sanguine), ALA urinaire...ou de produits de l'altération de mécanismes de défense de l'organisme (adduits à l'ADN).

Un biomarqueur de susceptibilité désigne la capacité innée ou acquise d'un organisme à répondre à l'exposition à une substance xénobiotique spécifique (réponse enzymatique : N-acétyltransférase, glutathion-S-transférase, enzymes du cytochrome P450...) (World Health Organization, 2001). Ce marqueur est utile lors de la surveillance de populations présentant des susceptibilités génétiques particulières aux effets toxiques de certaines substances chimiques.

L'évaluation de l'imprégnation ou de l'exposition ne se limite pas au milieu de travail mais est également adaptée à la biosurveillance en population générale. Elle permet l'évaluation des expositions liées à la pollution de l'environnement et constitue de ce fait un outil de surveillance pour une meilleure connaissance des effets sur la santé. En France, l'Enquête Nationale Nutrition Santé (ENNS) réalisée par l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) fournit une première estimation de l'exposition de la population française aux métaux

et aux métalloïdes. On retrouve également d'autres programmes nationaux de surveillance dans les pays tels que les États-Unis depuis 1960 avec le National Health and Nutrition Examination Survey program (NHANES) ; en Allemagne depuis 1985 avec le German Environmental Survey (GerES) ; et au Canada depuis 2007 avec l'Enquête Canadienne sur les Mesures de Santé (ECMS) (Leblanc et al., 2004).

I.2.4. Valeurs limites utilisées pour l'évaluation des expositions

On parle de VBI ou valeur biologique d'interprétation (en population professionnellement exposée et/ou en population générale). Les paramètres mesurés sont appelés indicateurs biologiques d'exposition (IBE), biomarqueurs d'exposition ou encore bio-indicateurs d'exposition. Les références auxquelles on peut comparer les IBE sont dénommées VBI. La VBI est une valeur à laquelle on peut se référer pour interpréter le résultat d'un IBE dans le cadre de la SBEP (Surveillance Biologique d'Exposition Professionnelle). Ces valeurs limites peuvent être établies spécifiquement dans un contexte d'exposition professionnelle ou en population générale.

I.2.4.1. Les valeurs biologiques en population générale

Les valeurs de référence en population générale ne sont pas considérées comme protectrices de l'apparition d'effets sanitaires.

Les VBI en population générale sont définies soit :

- A partir de la distribution des valeurs d'un IBE mesuré dans la population générale adulte ; elles sont le plus souvent établies à partir du 95^{ème} percentile (VR95).
- A partir de la distribution des valeurs d'un IBE mesurées dans une population professionnelle non exposée à l'agent chimique concerné.

Par ailleurs, certains organismes internationaux commencent à élaborer des valeurs seuils basés sur les effets sanitaires.

Les valeurs de référence (VR95) ont une signification statistique et constituent un outil important dans la détection de population exposée et la prévention. Pour les substances dont les valeurs protectrices seuil ne sont pas connues les valeurs (VR95) peuvent être utilisées pour l'évaluation des risques. On retrouve ainsi en **Allemagne** les valeurs **Biologische Arbeitsstoff-Referenzwerte** (BAR). La BAR permet de décrire les niveaux biologiques usuels des substances qui sont présentes dans l'environnement à un moment donné, dans une population de référence, chez des personnes en âge de travailler qui ne sont pas professionnellement exposées à ces substances. Les valeurs de références BAR sont basées sur le 95^{ème} percentile sans tenir compte des effets sur la santé. Les valeurs BAR peuvent être

influencées par des facteurs tels que l'âge, le sexe, le statut social, l'environnement résidentiel et le style de vie.

L'**ANSES** en **France** recommande des **valeurs biologiques de référence** (VBR). Elles correspondent à des concentrations retrouvées dans une population générale d'adultes dont les caractéristiques sont proches de celles de la population française (préférentiellement pour les indicateurs biologiques d'exposition) ou à défaut, dans une population de témoins non professionnellement exposés à la substance étudiée (préférentiellement pour les indicateurs biologiques d'effets).

Les BGV (**Biological Guidance Values**) sont déterminées par le **SCOEL**. Une BGV représente généralement le 90ème ou 95ème percentile de la concentration supérieure de la substance ou d'un de ses métabolites dans une population de référence définie. Une valeur supérieure à la BGV permet d'identifier la nécessité d'un examen approfondi des conditions de travail.

Contrairement aux valeurs de référence (VR95), les données de biosurveillance humaine communément appelées HBM (Human Biomonitoring data), sont quant à elles proposées par rapport à l'existence d'un risque sanitaire et basées soit sur les DJA (Doses Journalières Admissibles) soit sur la relation exposition-effets dans des études épidémiologiques.

La commission allemande de biosurveillance décrit deux niveaux biologiques de vigilance qui sont (HBM-I) et (HBM-II) :

- HBM-I désigne la concentration biologique dans une matrice donnée, en dessous de laquelle, a priori aucun effet indésirable ne saurait être détecté. C'est une valeur qui est donc considérée comme valeur de contrôle lors d'un dosage.
- HBM-II désigne la concentration biologique dans une matrice donnée, au-dessus de laquelle des effets indésirables sur la santé se produisent.

Compte tenu du nombre limité d'études sur les effets biologiques des substances toxiques chez l'homme, peu de données HBM existent pour les éléments métalliques. (Voir tableau 14).

I.2.4.2. Valeurs limites biologiques en milieu professionnel

Les valeurs biologiques pour lesquelles les données scientifiques ne rapportent pas d'effet sanitaire, sont appelées valeurs limites biologiques (VLB). La VLB est déterminée idéalement sur la base d'une exposition professionnelle journalière, correspondant à une exposition à la VLEP (valeur limite d'exposition professionnelle) sur 8H, du toxique induisant un effet sanitaire. Récemment, la Société française de médecine du travail, en partenariat avec la société française de toxicologie analytique et la société de toxicologie clinique, a élaborée des

recommandations de bonnes pratiques sur la surveillance biologique des expositions professionnelles aux agents chimiques (SFMT, 2016).

Tableau 14 : Données de biosurveillance humaine (HBM) pour les éléments métalliques proposées par la Commission allemande (mercure, cadmium, thallium) (Angerer et al., 2011)

Paramètre ou milieu biologique	Population/ âge du groupe	Valeur HBM-I	Valeur HBM-II
Sur la base d'études épidémiologiques			
Plombémie	Hommes & Femmes	Suspendu**	Suspendu**
Mercure sanguin	Enfants et adultes*	5 µg/L	15 µg/L
	Population générale	-	-
Cadmium urinaire	Enfants et adolescents	0,5 µg/L	2 µg/L
	Adultes	1 µg/L	4 µg/L
Mercure urinaire	Enfants et adultes	7 µg/L	25 µg/L
		5 µg/g créat	20 µg/g créat
Thallium urinaire	Population générale	5 µg/L	-

* Femmes en âge d'avoir des enfants ; créat : créatinine urinaire

** Suspendu en 2010, la Commission estime qu'il n'y a pas d'exposition au plomb considérée comme « en toute sécurité »

I.2.4.2.1. Valeur limite biologique réglementaire contraignante

Concernant les éléments trace métalliques, une seule valeur limite biologique réglementaire existe, et concerne le plomb métallique et ses composés. Les (VLB) à ne pas dépasser en France sont fixées à 400 µg de plomb par litre de sang pour les hommes et à 300 µg/L de sang pour les femmes (Code du travail - Article R. 4412-152). Pour les autres éléments métalliques, il existe des valeurs guides, ou IBE sans valeurs limites biologiques.

I.2.4.2.2. Indicateurs biologiques d'exposition et valeurs guides

Les BEI (Biological exposure indice), BAT (Biologischer Arbeitsstoff-Toleranz-Werte) et BLW (Biologische Leitwerte) sont des valeurs de référence américaines et allemandes déterminées sur le fait que durant leurs vies professionnelles, les travailleurs sont exposés pendant 8 heures par jour et 40h par semaine (Angerer et al., 2011). Les limites biologiques fixées par les organismes nationaux américain et allemand sont présentées dans le tableau 15.

- ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists

Biological exposure indice (BEI) ou indice d'exposition biologique, désigne généralement la concentration seuil en dessous de laquelle, les travailleurs exposés ne

présentent pas d'effets sanitaires indésirables. Ce sont des valeurs guides Américaines, pour la surveillance, correspondant aux concentrations biologiques retrouvées chez des travailleurs en bonne santé après une exposition par inhalation à des concentrations égales à la TLV (Threshold Limit Value) désignant la concentration maximale admissible d'une substance, exprimée en ppm, à laquelle un ouvrier peut être exposé pendant 8 heures de travail. Ces valeurs sont valables aussi bien pour les substances cancérigènes que les non cancérigènes.

- "German Commission for the investigation of Health Hazards of Chemicals Compounds in the Work Area" / (DFG- Deutsche Forschungsgemeinschaft)

Biologischer Arbeitsstoff-Toleranz-Wert (BAT) est la valeur biologique de référence proposée par les hygiénistes allemands. Elle correspond à la quantité maximale tolérable dans l'organisme humain d'une substance industrielle ou de ses métabolites, qui, d'après l'état actuel des connaissances scientifiques, n'affecte pas la santé des travailleurs même si les conditions de travail sont telles que le travailleur est régulièrement exposé et que ce niveau biologique est régulièrement atteint. Ces valeurs sont proposées uniquement pour les substances ne présentant pas de risques importants sauf à des concentrations très élevées. Remarque : les BAT ne concernent pas les substances cancérigènes.

Biologische Leitwerte, biological guideline values (BLW) proposées par les hygiénistes allemands est la quantité de substance chimique ou de ses métabolites ou de l'écart par rapport à la norme des paramètres biologiques induits par la substance, chez les humains exposés, servant d'indicateurs pour la mise en place de mesures de protection. La BLW est adaptée pour des substances cancérigènes ou suspectées et les substances dont on ne connaît pas les valeurs toxiques.

- Finnish Institute of Occupational Health (FIOH)

Biological action level (BAL) proposée par le Finnish Institute of Occupational Health (FIOH) (Finlande) correspond à la quantité maximale tolérable d'une substance industrielle ou de ses métabolites dans l'organisme des travailleurs exposés.

- Institut de recherche en santé et sécurité au travail au Québec (IRSST)

Indice biologique d'exposition (IBE) est l'acronyme utilisé pour les valeurs proposées par l'Institut de recherche en santé et sécurité au travail (IRSST) pour le Québec. Elles ont la même signification que les BEI américaines.

- ANSES en France

Valeurs Guides Françaises non réglementaires (VGF) ont été élaborées par le GSSAT (Groupe scientifique pour la surveillance des atmosphères de travail) en 1993 ; aujourd'hui considérées comme obsolètes car des abaissements des valeurs limites atmosphériques pour

certain agents chimiques ont été définis par arrêté, ou des modifications de classification et d'étiquetage, sans que les modifications de valeurs-guides françaises ne suivent.

Les IBE recommandés en France sont présentés dans une liste élaborée par l'Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail. Ces valeurs sont validées et recommandées par le Comité d'experts spécialisés de l'ANSES « valeurs limites à des agents chimiques en milieu professionnel » (CES VLEP). Elles sont issues des travaux d'expertise réalisés par le groupe de travail « Indicateurs Biologiques d'Exposition » composé d'experts pluridisciplinaires. Deux types de valeurs biologiques sont recommandées par l'ANSES : des valeurs limites biologiques (VLB) et/ou des valeurs biologiques de référence (VBR) qui font référence à la population générale ou à une population de témoins non professionnellement exposés à l'agent chimique étudié.

Les Valeurs limites biologiques (VLB) visent à protéger des effets néfastes liés à l'exposition à moyen et long termes, les travailleurs exposés à l'agent chimique considéré, régulièrement et pendant la durée d'une vie de travail.

- Autres Valeurs Biologiques d'Interprétation en milieu professionnel

Valeur Biologique Admissible (VBA) : Valeur de référence proposée par le Laboratoire de Toxicologie Industrielle de l'Université Catholique de Louvain (UCL-TOXI) (Belgique) correspondant à la quantité maximale tolérable dans l'organisme des travailleurs exposés d'une substance industrielle ou de ses métabolites.

Valeur Biologique Tolérable (VBT) : Valeur de référence proposée par la SUVA (Suisse), entreprise de droit public indépendante d'assurance contre les conséquences des accidents et des maladies professionnelles. C'est la concentration d'une substance, de ses métabolites ou d'un paramètre indicateur d'effet dans un liquide biologique correspondant, pour laquelle la santé d'un travailleur n'est, dans la vaste majorité des cas, pas mise en danger, même lors d'exposition répétée ou à long terme.

Tableau 15 : Les limites biologiques fixées par les organismes nationaux américain et allemand

Métaux	Echantillons	Limites de l'ACGIH (BEI)¹	Limites de la DFG ²
Aluminium	Urine		60µg/g créatinine (BAT)
Antimoine	Urine		(EKA**)
Arsenic	Urine (arsenic inorganique + métabolites méthylés)	35 µg/L (fin de semaine de travail)	50µg/L (BLW) 15µg/L (BAR)
Béryllium	Urine		0,05 µg/L (BAR)
Cadmium	Sang Urine	5 µg/L 5 µg/g de créatinine	1 µg/L (BAR) 0,8 µg/l (BAR)
Chrome (composés solubles)	Sérum/plasma Urine	25 µg/L (fin de poste, fin de semaine de travail); 10 µg/L (augmentation en cours de poste)	0.6 µg/L (BAR) (EKA**)
Cobalt	Urine Sang	15 µg/L (fin de poste, fin de semaine de travail) 1 µg/L (fin de poste, fin de semaine de travail)	(EKA**)
Suite Tableau 12			
Métaux	Echantillons	Limites de l'ACGIH (BEI)¹	Limites de la DFG ²

Manganèse	Sang Urine		15 µg/L (BAR)
Mercure inorganique	Sang	15 µg/L (fin de poste, fin de semaine de travail) 35 µg/g créatinine (avant la prise de poste)	25 µg/g créatinine (BAT)
	Urine	(avant la prise de poste) 20µg/g créatinine	
Nickel (composés solubles)	Urine		3 µg/L (BAR) (EKA**)
Plomb	Sang	300µg/L (non critique)	Femmes <45 ans : 100 µg/L 400 µg/L (BLW)
Sélénium	Sérum	-	150 µg/L (BAT)
Vanadium (composés inorganiques)	Urine	-	(EKA**)

* Concentrations urinaires par gramme de créatine. ** EKA = équivalents d'exposition pour les produits cancérogènes.

1- BEI = indices biologiques d'exposition recommandés par l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012).

2 - Limites de tolérance biologique recommandées par la DFG (DFG, 2010).

I.2.4.3. Valeurs de référence des ETM, exprimées en µg/L, retrouvées dans la matrice « sang total » (littérature scientifique)

I.2.4.3.1. Lithium (Li) sanguin

	Population	Statut	5° Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95° Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0,20	0.86 ± 0.54	**	0.71	1.87	**
(Cesbron et al., 2013)	N= 106	Non exposé	**	**	**	< 1.2	< 1.4	**

I.2.4.3.2. Béryllium (Be)

	Population	Statut	5° Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95° Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N= 100	Non exposé	0,02	**	**	0.02	0.09	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0,10	0.42	**	0.44	0.75	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0,008	**	< 0.008	**	0,015	<0.008-0.04
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	**	**	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
(Ivanenko et al., 2013)	N= 50	Exposé		0,036	**	0.035	**	0.004-0.079

I.2.4.3.3. Magnésium (Mg)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	32824	40420 ± 5,309	**	40329	49276	**
(Bulat et al., 2009)	N= 32	Exposé	**	43980 ± 3354	**	**	**	**
	N=15	Non exposé	**	48630 ± 6718	**	**	**	**
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	30179 ± 4162	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	28268 ± 3441	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	27623 ± 4741	**	**	**	**

I.2.4.3.4. Aluminium (Al)

	Population	Statut	5° Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95° Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	1.28	**	**	1.3	6.35	**
(Alimonti et al., 2005)	N=110	Non exposé	5.93	17.0 ± 9.37	**	15.3	33.3	**
(Ivanenko et al., 2013)	N= 50	Exposé	**	261	**	248	**	160-411

I.2.4.3.5. Vanadium (V)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N=110	Non exposé	0.03	0.09 ± 0.05	**	0.08	0.18	**
(Heitland and Köster, 2006)	N= 130	Non exposé	0.021	0,052	0,045	**	< 0.103	< 0,016-0,11
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	< 0,21	**	**	< 0.21	< 0,35	< 0,21- 0,35
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	0,576	**	0.515	**	0.241-1.11

I.2.4.3.6. Chrome (Cr)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Minimum-Max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0,12	0.44 ± 0.27	**	0.38	1.07	
(Gil et al., 2011)	N=178	Exposé (professionnellement)	0.10	1.31±3.01	0.58	0.78	4.04	0.10 - 37.90
(Ivanenko et al., 2013)	N= 50	Exposé	**	6.65	**	6.24	**	1.14 - 14.3
(Khelifi et al., 2013)	N=350	Exposé	1.29	35.04±26.02	**		84.02	0.42 - 108
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	< 0.33	**	**	0.55	0.87	**

I.2.4.3.7. Fer (Fe)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	453519	549839 ± 60,937		547589	64649	**
(Bulat et al., 2009)	N= 32	Exposé	**	587070	**	**	**	**
	N=15	Non exposé	**	631590	**	**	**	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	407000		406000	**	230000-580000
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	449104.09	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	497669.02	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	500542.58	**	**	**	**

I.2.4.3.8. Manganèse (Mn)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	1.53	7.7 ± 3.1		7.85	13.2	**
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	5	**	**	7.6	12.8	
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	5.7	9.0	8.6	**	14.6	4.8-18
(Bocca et al., 2011)	N= 215	Non exposé	4.73	**	8.91	8.79	17.0	**
(Gil and Hernández, 2015)	N=178	Exposé (professionnellement)	2.25	8.68±6.35	7.05	7.55	17.74	0.12 - 47.83
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	13.6	**	12.7	**	7.7-23.5
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	< 5.9	**	**	8.6	13.3	**
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	22.35 ±7.53	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	25.39± 31.75	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	21.12 ± 23.14	**	**	**	**
(CDC, 2015) Cohorte 2011-2012	N= 7920	Non exposé	**	**	9.35	9.22	16.7	

I.2.4.3.9. Cobalt (Co)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.03	0.12 ± 0.08	**	0.11	0.24	**
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.04	**	**	0.25	0.64	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.05	0.19	0.14	**	0.41	0.04- 0.8
(Ivanenko et al., 2013)	N= 50	Exposé	**	0.788	**	0.546	**	0.175-4.19
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	0.20	**	**	0.27	0.63	**

I.2.4.3.10. Cuivre (Cu)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	686	938 ± 141	**	935	1157	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	804	1042	1020	**	1620	720- 1800
Bocca et al.2011	N= 215	Non exposé	776	**	1036	1011	1495	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	803	**	839	**	538-1081
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	743	**	**	937	1513	**
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	1017.44 ± 235.46	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	948.19 ± 106.98	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	1386.84 ± 590.29	**	**	**	**

I.2.4.3.11. Zinc (Zn)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	5189	6717 ± 924	**	6597	8337	**
(Bulat et al., 2009)	N= 32	Exposé	**	5640 ± 772	**	**	**	**
	N=15	Non exposé	**	6170 ± 776	**	**	**	**
(Bocca et al., 2011)	N= 215	Non exposé	4686	**	6418	6387	8585	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	5570	5593 ± 809	5593	**	3747-6908
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	4220	**	**	5617	7198	**
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	19739.24 ± 15515.37	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	22055.71 ± 17454.97	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	12805.39 ± 7443.16	**	**	**	**

I.2.4.3.12. Arsenic (As)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	2.6	**	**	5.0	17.8	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.16	0.93	0.71	**	2.3	0.13 - 4.2
(Khlifi et al., 2013)	N= 350	Exposé	0.01	1.56±2.49	0.17		6.79	0.02 -18.15
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	1.08	**	**	1.87	7.10	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé		3.13	**	2.68		1.10 - 10
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	17.23 ±11.13	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	17.23 ±11.13	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	11.67± 6.58	**	**	**	**

I.2.4.3.13. Sélénium (Se)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	89	**	**	119	154	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	105	133	132	**	164	85- 182
(Bocca et al., 2011)	N= 215	Non exposé	106	**	140	138	185	**
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	85	**	**	110	142	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	163	**	158	**	99.8-268.1
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	200.38 ± 39.3	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	226.21 ± 58.56	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	198.44 ± 41.98	**	**	**	**
(CDC, 2015) Cohorte 2011-2012	N=7920	Non exposé	**	**	190	190	236	**

I.2.4.3.14. Strontium (Sr)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	9	**	**	16	41	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	10.1	27.3 ± 11.8		25.5	50.3	
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	11.0	20.0	19.0	**	39.0	10 -77
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	8.2	**	**	14.5	35.0	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	53.8	**	31.4	**	19-718

I.2.4.3.15. Molybdène (Mo)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.77	**	**	2.9	7.86	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	1.02	3.06 ± 1.57		2.88	6.03	
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.14	0.43	0.33	**	1.1	0.06 -4
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	9.25 ± 8.48	**		**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	6.78 ± 7.20	**		**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	3.75 ± 2.64	**		**	**
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	0.26	**	**	0.40	0.77	**
(Schultze et al., 2014)	N=998	Non exposé	**	1.07 ± 0.59	**	0.93	**	**

I.2.4.3.16. Rhodium (Rh)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0.006	**	< 0.006	**	< 0.006	< 0.006–0.009

I.2.4.3.17. Palladium (Pd)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.01	**	**	0.08	0.71	
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0.02	< 0.02	< 0.01	**	0.029	0.02–0.09

I.2.4.3.18. Cadmium (Cd)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
Roggi et al.1995	N=514	Non exposé	0.20	0.62	0.50			0.16-1.94
Herber et al.1997	N=434 donneurs de sang	Non exposé	**	**	0.7		2	0.1-3.4
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.25	0.99 ± 0.51	**	0.95	1.97	
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.15	**	**	0.31	2.04	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.12	0.57	0.38	**	1.9	0.10 - 4.1
(McKelvey et al., 2007)	N= 1811	Non exposé		**	0.77 µg/L		**	**
Farzin et al.2008	N=101	Non exposé	**	1.82±0.67	**		**	**
(Bulat et al., 2009)	N= 32	Exposé	**	10.21 ± 2.671	**	**	**	**
	N=15	Non exposé	**	Non détectable	**	**	**	**
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	2.31 ± 0.32	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	2.62 ± 0.94	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	2.44± 0.68	**	**	**	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	2.17	**	2.01	**	0.85-5.56

Cadmium (suite)	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	0.13	**	**	0.34	1.82	**
(Khlifi et al., 2013)	N= 350	Exposé	0.01	0.74±1.15	**		2.31	0.02-12.40
(Laamech et al., 2014)	N=196 enfants	Exposé	0.067	0.221	**		0.676	**
(Gil and Hernández, 2015)	N=162	Exposé (professionnellement)	0.01	0.49±0.61	0.18	0.22	1.62	0.02- 4.14
(CDC, 2015) Cohorte 2011- 2012	N= 7920	Non exposé	**	**	0.279	0.250	1.50	**
(Choi et al., 2012)	N=5364	Population générale	**	0.330	0.376		1.70	**

I.2.4.3.19. Etain (Sn)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.11	**	**	1.1	1.75	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.63	1.51 ± 0.60	**	1.48	2.61	
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.03	0.18	0.12	**	0.55	0.02- 0.81
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	0.16	**	**	0.34	0.64	**

I.2.4.3.20. Antimoine (Sb)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Range
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.05	**	**	0.08	0.13	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.07	0.47 ± 0.26	**	0.41	0.94	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0.013	< 0.013	< 0.013	**	< 0.040	0.013–0.13

I.2.4.3.21. Baryum (Ba)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	46.4	**	**	59	77.6	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.50	1.25 ± 0.61	**		2.40	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.4	0.8	0.8	**	1.2	0.17 -1.9
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	84.5	**	83.1	**	57.1-123

I.2.4.3.22. Cérium (Ce)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.008	<0.008	<0.008	**	0.016	<0.008- 0.03

I.2.4.3.23. Tungstène (W)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.03	0.07 ± 0.03	**	0.06	0.14	**
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.04	**	**	0.006	0.082	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0.011	< 0.011	< 0.03	**	0.017	<0.011-0.1
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	< 0.03	**	**	< 0.03	< 0.03	**

I.2.4.3.24. Platine (Pt)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.002	**	**	0.002	0.010	**

I.2.4.3.25. Mercure (Hg)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.94	**	**	3.00	8.13	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	1.97	6.36 ± 4.11	**	4.94	14.5	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	0.2	1.4	0.9	**	3.3	0.02 -16
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	0.59	**	**	1.72	5.12	**
(McKelvey et al., 2007)	N= 1811	Non exposé		**	0.273	**	**	**
(CDC, 2015) Cohorte 2011-2012	N=7920	Non exposé	**	**	0.703	0.640	4.40	**

I.2.4.3.26. Thallium (Tl)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.011	**	**	0.02	0.035	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.03	0.07 ± 0.04	**	0.07	0.15	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	0.023± 0.008		0.022	**	

I.2.4.3.27. Plomb (Pb)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	11.4	**	**	26	62.8	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	12.8	39.5 ± 20.2	**	35.0	79.5	**
(Heitland and Köster, 2006)	N=130	Non exposé	8	22	19	**	47	5-83
(Farzin et al., 2008)	N=101	Non exposé	**	3.75±56.42	**		**	**
Gil et al.2011	N=162	Exposé (professionnellement)	0.42	43.39±52.6	8.88	27.23	157.53	0.42-236.34
(Coelho et al., 2013)	N= 41	Exposé (environnement)	**	34.08 ± 39.39	**	**	**	**
	N= 41	Exposé (professionnellement)	**	63.72 ± 58.56	**	**	**	**
	N= 40	Non exposé (témoin)	**	36.01 ± 25.81	**	**	**	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	28.4	**	25.8	**	16.4-54.4
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	5.4	**	**	12.5	39.3	**
(Laamech et al., 2014)	N=196 enfants	Exposé	**	55.53	**	**	**	7.5– 231.1
(CDC, 2015) Cohorte 2011-2012	N=7920	Non exposé	**	**	9.75	9.30	31.6	

I.2.4.3.28. Bismuth (Bi)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.001	**	**	0.001	0.007	**
(Alimonti et al., 2005)	N= 110	Non exposé	0.02	0.03 ± 0.02	**	0.03	0.06	**
(Heitland et Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0.008	**	< 0.008	**	< 0.008	< 0.008- 0.02
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	< 0.03	**	< 0.03	**	< 0.03	**

I.2.4.3.29. Uranium (U)

	Population	Statut	5e Percentile	Moyenne	Moy géométrique	Médiane	95e Percentiles	Min-max
(Goullé et al., 2005)	N=100	Non exposé	0.002	**	**		0.006	**
(Heitland et Köster, 2006)	N=130	Non exposé	< 0.003	< 0.003	< 0.003	**	0.004	< 0.003-0.006
(Cesbron et al., 2013)	N=106	Non exposé	< 0.01	**	< 0.001	**	< 0.001	**
(Ivanenko et al., 2013)	N=50	Exposé	**	0.04	**	0.034	**	< LD- 0.12

LD: Limite de détection

TRAVAUX DE RECHERCHE

II. DEUXIEME PARTIE : Travaux de recherche

L'amélioration de l'état de santé et la sécurité au travail des acteurs de l'économie informelle constitue du fait de leur grand nombre et de leur contribution au PIB, un atout majeur pour la croissance et le développement du Bénin et des pays concernés.

Dans ce contexte, l'objectif principal de notre recherche a été d'étudier l'impact des conditions de travail, sur la santé des ferblantiers à Cotonou au Bénin.

L'évaluation du niveau d'imprégnation des ferblantiers en ce qui concerne les métaux lourds toxiques et autres éléments traces a nécessité d'avoir des valeurs de référence en population Béninoise. En effet, la pollution de l'air et de l'eau, de même que l'alimentation peuvent conduire à une exposition à certains contaminants tels les métaux lourds (plomb, cadmium, mercure, ...). Pour pouvoir juger si une personne est exposée ou non à un tel métal du fait de sa profession, il est tout d'abord primordial de connaître quelles sont les concentrations de base de la population non exposée professionnellement. A Cotonou, les niveaux de référence sont inexistantes et les rares études menées utilisaient soit des outils analytiques peu performants, soit des données scientifiques de référence issues de projets réalisés ailleurs. Ces données ne s'appliquent pas nécessairement à la population béninoise, compte tenu des variations des modes de vie et de l'environnement.

II.1. Objectifs

L'objectif général de notre recherche est d'étudier l'impact des conditions de travail sur la santé des ferblantiers exerçant dans le cadre de l'économie informelle, à Cotonou au Bénin. Les objectifs spécifiques se déclinent comme suit :

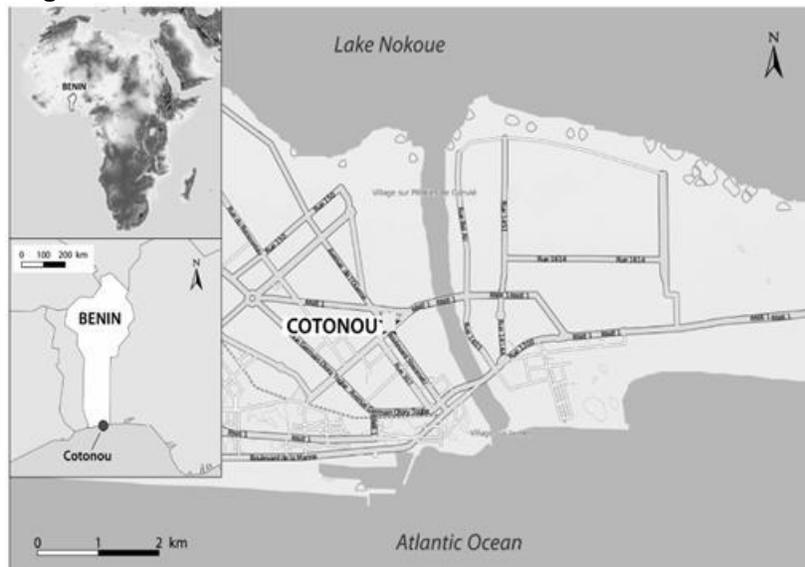
- Première partie : Décrire les conditions de travail et l'état de santé des Ferblantiers à travers une étude de poste et un entretien médical.
- Deuxième partie : Déterminer par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS), les valeurs usuelles d'une trentaine d'éléments métalliques dans la population masculine non exposée professionnellement à Cotonou puis comparer ces valeurs à celles retrouvées chez les artisans ferblantiers.

II.2. Site de l'étude

Cette étude a été réalisée à Cotonou, la capitale économique du Bénin. Contrairement à tous les autres départements du Bénin, celui du Littoral est constitué d'une seule commune, Cotonou, d'une superficie de 79 Km². La ville de Cotonou est composée de 13 arrondissements et de 140 quartiers. La commune est limitée à l'Ouest par le département de l'Atlantique et à l'Est par le département de l'Ouémé. L'océan Atlantique forme la limite sud du département. Au nord, la commune de Cotonou est traversé par une lagune et limitée au Nord par le lac Nokoué (INSAE, 2004). Les unités relevant de la branche « Métaux et constructions métalliques » représentent 20,4% des entreprises artisanales au Bénin. L'essentiel des unités artisanales sont concentrées dans la commune de Cotonou qui abrite à elle seule environ 30% des unités artisanales (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2010).

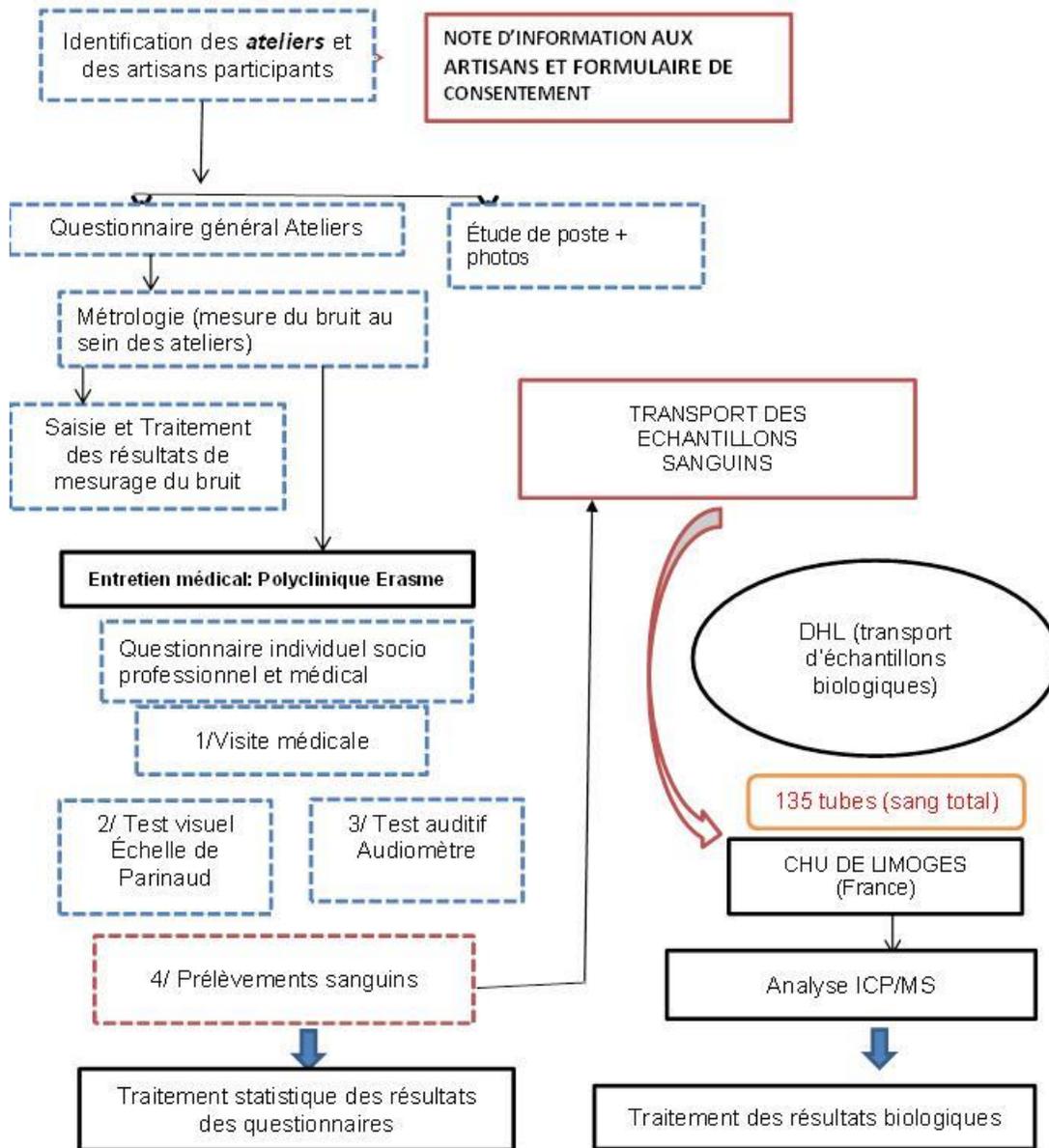
La carte de la ville de Cotonou est présentée figure 10.

Figure 10 : Carte de la ville de Cotonou située au sud du Bénin



Le travail de recherche s'est intéressé plus précisément aux artisans ferblantiers du 3^e arrondissement de la ville de Cotonou, compte tenu du fait qu'ils sont regroupés sur un même site dans le quartier de Midombô. Le plan d'étude est présenté à la figure 11.

Figure 11 : Schéma montrant les différentes étapes de l'étude chez les ferblantiers



Première partie des travaux

La première partie de nos travaux a permis l'évaluation des conditions de travail des maitres artisans et de leurs apprentis. Il s'agissait de décrire les activités et les expositions au poste de travail tout en menant une investigation sur l'état de santé général des artisans ferblantiers.

II.3. Article N° 1 : Risques professionnels, conditions de travail et état de santé des ferblantiers travaillant dans l'économie informelle à Cotonou, Bénin

[Occupational exposure, working conditions and health profile of tinsmiths working in the informal economy in Cotonou, Benin]

Pour soumission à "Occupational and Environmental Health" Impact Factor: 3.745

B. Yedomon, K. Afokpa, B. Fayomi, P. Ayelo, F. Dutheil, C. Møesch, M. Druet-Cabanac

1. Introduction

L'emploi informel représente plus de la moitié des emplois non agricoles dans les pays en développement et contribue à l'économie globale, en fournissant des biens et des revenus à ses acteurs (Chen, 2016). En Afrique subsaharienne, le « secteur informel » concerne plus de 60 % de la main-d'œuvre urbaine, et est à l'origine de plus de 90 % des nouveaux emplois créés au cours des années 90 (Bacchetta et al., 2009). Les branches d'activités informelles dans ces pays sont très diversifiées et concernent autant l'artisanat, l'agriculture, l'exploitation des ressources minières que le recyclage de déchets électriques et métalliques. Cependant, peu de données sont disponibles sur ces activités. Ce manque de connaissances limite la mise en place de politiques et de programmes de promotion et de sécurité nécessaires à l'amélioration des conditions de travail décentes (Luchini et London, 2014). Malgré l'importance économique et sociale de ce secteur, la majorité des travailleurs de l'économie informelle est dépourvue de protection sociale (Canagarajah et Sethuraman, 2001). L'environnement et les conditions de travail précaire sont les principaux facteurs à l'origine d'altération de la santé et de la diminution du bien-être général des travailleurs informels. Les conséquences sanitaires chez les travailleurs informels restent peu documentées en raison de la rareté des données permettant d'évaluer les expositions professionnelles et par le fait que les autorités nationales accordent la priorité aux difficultés économiques (Basu et al., 2016). Cette précarité est accentuée par la carence de suivi par des services de santé au travail (Theuri, 2012).

Au Bénin, 90,4 % des actifs âgés de 15 à 64 ans travaillent dans le secteur informel (INSAE, 2012). Le secteur informel béninois regroupe plusieurs branches d'activités au nombre desquelles l'agriculture et l'artisanat tiennent les premiers rôles. Parmi les branches d'activités de l'artisanat, la branche « Métaux et constructions métalliques » représente 20,4 % des unités

artisanales et 82 % de ces unités accueillent des apprentis. L'activité de forgeron-ferblantier a été peu étudiée. Dans une étude menée en 1998 chez 153 apprentis ferblantiers, il était retrouvé des conditions de travail pouvant avoir un impact sur le développement physiologique ultérieur de ces jeunes travailleurs (Tossou, 2001). En 2010, l'évaluation des conditions de travail des apprentis en milieu artisanal à Cotonou montrait que 58,3 % des chefs d'ateliers enquêtés ne disposaient pas d'équipements de protection individuelle recommandés, ni pour eux même, ni pour les apprentis et s'exposaient fortement à des nuisances physiques et chimiques (Ayelo et al, 2010). Étant donné le peu d'information disponibles sur l'activité de forgeron-ferblantier dans le secteur informel au Bénin et les conséquences potentielles sur la santé de ces travailleurs, nous avons réalisé une étude ayant comme objectifs d'évaluer les conditions de travail et leurs conséquences sur la santé des artisans ferblantiers et de leurs apprentis.

2. Méthodologie

Une étude transversale a été réalisée à Midombô sur le site des artisans ferblantiers dans le 3^{ème} arrondissement de Cotonou au Bénin. Cette enquête s'est déroulée d'octobre 2015 à janvier 2016. Dans un premier temps, il a été réalisé une visite des ateliers du site des artisans ferblantiers et des études de poste ont permis d'évaluer les conditions de travail et de mesurer les nuisances auxquelles les travailleurs étaient exposés. Dans un deuxième temps, les travailleurs de ces ateliers ont bénéficié d'un entretien médical afin de déterminer leur état de santé.

2.1. Population d'étude

Le nombre d'unités artisanales informelles de forgeron-ferblantier sur le site de Midombô était de 102 ateliers. L'identification des ateliers a été réalisée sur le site après une cartographie des différents ateliers et un numéro d'identification spécifique a été attribué à chaque atelier. L'étude des ateliers a été réalisée après obtention de l'accord des responsables de ces ateliers. Ont été inclus dans l'étude, tous les ferblantiers (apprenti ou maître artisan) exerçant dans les ateliers du site et ayant donné leur consentement éclairé de participation (pour les apprentis de moins de 18 ans, consentement du tuteur légal). Les personnes ayant une autre activité principale que celle de forgerons-ferblantiers, non permanentes sur le site ou ayant refusé de participer à l'étude n'ont pas été incluses dans cette étude. La notion d'apprenti n'ayant pas de définition légale dans le secteur informel, un apprenti a été défini dans cette étude comme tout ferblantier âgé de moins de 18 ans ou ayant moins de 5 années d'ancienneté dans le métier. Au total, 84 ateliers ont été investigués et 135 ferblantiers ont accepté de participer à l'étude.

2.2. Recueil des données

Pour chaque atelier ayant participé à l'étude, une interview du maître artisan ou du chef d'atelier a permis d'obtenir des renseignements sur les personnels travaillant dans l'atelier (nombre d'artisans et d'apprentis, la durée hebdomadaire du travail, la prise de repas dans l'atelier, l'affiliation ou non à un modèle de sécurité sociale) et d'avoir une description des activités de l'atelier (objets fabriqués, outils utilisés) et des différents postes de travail. Des études des postes de travail ont été réalisées pour rechercher les nuisances auxquelles étaient exposés les ferblantiers et les moyens de prévention ou de protection mis à disposition par les responsables des ateliers. Les contraintes physiques (gestes répétitifs, postures pénibles, port de charges lourdes) et des expositions chimiques (utilisation d'acides, de solvants, de peintures, réalisation de soudures) ont été évaluées. L'utilisation d'un sonomètre (Brüel & Kjaer, type 2239) a permis de réaliser des mesures des ambiances sonores dans chaque atelier (mesure sur 5 minutes). Des photographies ont été réalisées pour illustrer les conditions de travail.

Pour les ateliers ayant accepté de participer à l'étude, chaque maître artisan ou apprenti de ces ateliers a été invité à un entretien médical gratuit. En absence de service de médecine du travail et de suivi médical pour cette population, les examens ont été réalisés à la polyclinique Erasme à Cotonou. Cet entretien était divisé en 2 temps. Dans un premier temps, les ferblantiers ont répondu à un questionnaire socio professionnel (âge, ancienneté dans le travail, niveau d'alphabétisation). Dans un deuxième temps, un entretien médical a été réalisé par un étudiant en médecine en fin de cursus des études médicales. Cet entretien a été réalisé à l'aide d'un questionnaire portant sur l'existence de symptômes respiratoires et de signes irritatifs des voies aériennes supérieures. Cet entretien a été complété par la mesure du poids, de la taille et de la tension artérielle (Omron® automatic blood pressure monitor) ainsi que par la mesure de l'acuité visuelle (test de Monnoyer) et auditive (AudioWin®20 et casque HDA 300). Le calcul du déficit auditif était la moyenne des déficits mesurés sur les fréquences 500, 1 000, 2 000 et 4 000 Hertz.

2.3. Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à partir du logiciel SPSS 20 (IBM Corporation, New York). Les statistiques quantitatives ont été effectuées par simple dénombrement et les résultats des variables qualitatives ont été exprimés en pourcentages. Les comparaisons des variables qualitatives ont été réalisées par des tests du Chi-2 ou des tests exacts de Fisher en fonction des effectifs théoriques, les comparaisons des variables quantitatives ont été réalisées par des tests U de Mann-Whitney. Le seuil de significativité choisi pour l'ensemble des analyses statistiques était de 5 %.

2.4. Aspects éthiques

Cette étude a reçu l'approbation du Comité d'Ethique de la Recherche de l'Institut des Sciences Biomédicales Appliquées du Bénin (avis favorable n°74 du 15/09/2015).

3. Résultats

3.1. Etude des ateliers de Midombô

Au total, 84 responsables d'atelier sur 102 ont donné leur accord de participation à l'étude soit un taux de participation de 82,4 %.

3.1.1. Activités dans les ateliers

Le nombre de personnes travaillant dans les 102 ateliers était de 251 maitres-artisans ou apprentis soit un nombre moyen de travailleurs par atelier de 3 personnes (± 2 personnes). Il était retrouvé 129 apprentis (51,4 %) répartis dans 58 ateliers et 122 artisans ou maitres-artisans (48,6 %).

Parmi les activités artisanales de ces ateliers, on relevait de nombreux objets métalliques destinés à la cuisson des aliments ou des contenants métalliques comme des arrosoirs ou des lampes à pétrole (tableau 1). Ces activités étaient complétées par la vente soit de métaux comme des plaques ou des tubes de fer (dans 41 ateliers soit 48,8 %) soit par la vente des produits manufacturés dans les ateliers (53 ateliers soit 63,1 %).

La fabrication de ces accessoires nécessitait une activité de découpage de plaques ou de tubes métalliques dans 79 ateliers (94,0 %), une activité de brossage ou de polissage des pièces dans 42 ateliers (50,0 %), une activité de soudage à l'étain dans 59 ateliers (70,2 %) et l'utilisation d'une forge à foyer ouvert brûlant des coques de noix palmiste dans 24 ateliers (28,6 %).

Tableau 1 : Fabrication artisanale d'accessoires en métal dans 84 ateliers de Midombô, Cotonou, Bénin

Activités artisanales des ateliers	Nombre	%
Fabrication de plaques de grillage	24	28,6
Fabrication de lampes à pétrole	14	16,7
Fabrication de serrures	9	10,7
Fabrication d'arrosoirs	7	8,3
Fabrication de fourneaux pour la cuisson	38	45,2
Fabrication de couteaux et de ciseaux	5	6,0

Les différents matériaux métalliques utilisés étaient des plaques de ferraille ou des fers à béton (dans 53 ateliers), des fils de fer issus de carcasses de pneumatiques usagés (dans 9 ateliers), des plaques de tôles galvanisées (dans 44 ateliers), des tôles noires (dans 38 ateliers) ou des tôles en inox (dans 16 ateliers). La fabrication des lampes à pétrole nécessitait l'utilisation de soudure d'étain et de l'acide chlorhydrique. Les responsables d'atelier déclaraient utiliser des peintures pour protéger les objets manufacturés dans 60 ateliers et des solvants dans 40 ateliers. Les ferblantiers utilisaient comme plan de travail des rails ferroviaires (92,5 %) ou des tambours de freins de camions (55,6 %). Les différents outils utilisés par les ferblantiers des ateliers de Midombô sont présentés au tableau 2.

3.1.2. Conditions de travail

L'analyse des conditions de travail lors de la visite des 84 ateliers de Midombô a permis de mettre en évidence que la prise des repas du midi était effectuée directement dans les ateliers dans 97,4 % des cas. Les ferblantiers travaillaient 6 jours par semaine et les journées de travail étaient en moyenne de 10,2 heures pouvant aller jusqu'à 12 heures. La durée hebdomadaire du travail était en moyenne de 61,2 heures mais pouvait atteindre 72 heures par semaine pour 13 ferblantiers. Les ateliers étaient le plus souvent encombrés et ne permettaient pas une bonne circulation dans 71 ateliers.

Tableau 2 : Outils utilisés par les ferblantiers pour la fabrication d'accessoires en métal dans 84 ateliers de Midombô, Cotonou, Bénin

Outils utilisés par les ferblantiers	Nombre	%
Poinçons	52	61,9
Pointeaux	17	20,2
Burins	77	91,7
Marteaux	81	96,4
Ciseaux	64	76,2
Compas	52	61,9
Equerres	54	64,3
Fer à souder	11	13,1
Soufflet pour la forge	24	28,6

L'étude des différents postes de travail dans les ateliers a permis de retrouver de nombreux postes entraînant des postures contraignantes pour le rachis ou nécessitant des gestes répétitifs des membres supérieurs (tableau 3).

Tableau 3 : Facteurs de risque de survenue de troubles musculo-squelettiques observés aux postes occupés par les ferblantiers lors de la fabrication d'accessoires en métal dans 84 ateliers de Midombô, Cotonou, Bénin

Facteurs de risque de survenue de TMS	Nombre	%
Contraintes posturales pour le rachis		
Travail en position assise	80	95,2
Travail en position debout	31	36,9
Travail en position accroupie	29	34,5
Travail en position penchée en avant	42	50,0
Gestes répétitifs pour les membres supérieurs		
Lors d'activité de martelage	74	88,1
Lors d'activité de découpage	26	31,0

TMS : troubles musculo-squelettiques

Une analyse des ambiances sonores a été réalisée dans les 84 ateliers pendant les horaires d'activité. Dans 40 ateliers (40,8 %), la communication entre les travailleurs était difficile et nécessitait de parler fort pour se faire comprendre à moins de 1 mètre et 35 (42,7 %) pour se faire comprendre à moins de 2 mètres. L'analyse sonométrique retrouvait des niveaux de pression acoustique continue équivalente pondérée (Leq) supérieurs à 85 décibels dans 49

ateliers (58,3 %) et des niveaux de pression acoustique de crête (Lpc) supérieurs à 135 décibels dans 5 ateliers (6,0 %). Les conditions de travail sont illustrées photographie 1.

Photographie 1 : Poste et conditions de travail dans un atelier de ferblantiers, site de Midombô, Cotonou, Bénin



3.1.3. Prévention et affiliation à un système de prévoyance

En termes de prévention, il n'existait aucun équipement de protection individuelle mis à disposition des ferblantiers dans les ateliers (pas de gants, pas de bouchons ou casques antibruit). Il est à noter qu'il n'y avait aucune trousse d'urgence permettant de soigner les plaies en cas de coupures. Seuls 2 responsables d'atelier avaient adhéré à un organisme de prise en charge en cas de problème de santé. Les causes justifiant cette absence d'adhésion à un système de prévoyance santé étaient le plus souvent le manque d'information (66,7 %), le coût élevé (18,5 %) ou le manque de confiance vis-à-vis de ces organismes (14,8 %). Par contre, la totalité des responsables cotisaient à un système de prévoyance, en particulier au système de tontine (84,5 %).

3.2. Etude des ferblantiers

3.2.1. Données socioprofessionnelles

Parmi les 251 personnes travaillant dans les 102 ateliers investigués, 135 ferblantiers ont accepté de venir au centre de santé Erasme (53,8 %) pour bénéficier d'un entretien médical gratuit. Dans cette population, 31 personnes étaient des apprentis (23,0 %) et 104 étaient des artisans ou maitres-artisans (77,0 %). Le niveau de scolarité, avant le début de l'activité professionnelle, était

pour la majorité le niveau primaire (74 soit 54,8 %) et 51 personnes n'avaient jamais été scolarisées (37,8 %). L'âge de début de l'activité de ferblantier était en moyenne de 13,2 ans (\pm 4,6 ans) mais certains avaient commencé le métier dès l'âge de 5 ans. L'ancienneté moyenne dans les ateliers était de 14,0 ans (\pm 10,3 ans). Des pauses pendant la journée de travail étaient prises par 79 ferblantiers (58,5 %).

3.2.2. Etat de santé

Parmi les 135 ferblantiers venus au centre Erasme, l'indice de masse corporelle (IMC) moyen était de 23,8 (\pm 4,4). Il existait un surpoids chez 29 personnes (21,5 %) et une obésité chez 11 personnes (8,1 %). La prise de la tension artérielle a permis de diagnostiquer 37 personnes hypertendues (27,4 %) et aucune n'était traitée. Les personnes hypertendues avaient un IMC significativement plus élevé ($p < 0,01$). Concernant la vaccination antitétanique, 32 personnes (23,7 %) avaient déjà été vaccinées mais seulement 16 avaient une vaccination datant de moins de 10 ans. L'examen de l'acuité visuelle retrouvait une baisse de l'acuité visuelle binoculaire chez 17 personnes (12,8 %) et une atteinte monoculaire chez 12 personnes (9,0 %). Aucune ne portait de lunettes de correction. L'examen audiométrique réalisé retrouvait des déficits auditifs légers à sévères chez 134 personnes (99,3 %). Seule une personne avait une audition normale et 69 avaient un déficit d'au moins 35 dB sur la meilleure oreille. La description des déficits auditifs est présentée tableau 4.

Tableau 4 : Analyse des atteintes auditives des ferblantiers venus au centre Erasme, Cotonou, Bénin

Atteintes auditives	Nombre	%
Déficit auditif léger (25 à 39 dB)	74	54,8
Déficit auditif modéré (40 à 69 dB)	58	43,0
Déficit auditif sévère (70 à 89 dB)	2	1,5
Atteinte bilatérale symétrique	107	79,3
Atteinte bilatérale asymétrique	24	17,8
Atteinte unilatérale	3	2,2

Au niveau pulmonaire, seulement 4 ferblantiers étaient fumeurs (3,0 %), 9 étaient connus comme asthmatiques (6,7 %) et un seul était traité. Des signes irritatifs des voies aériennes supérieures ou oculaires survenant sur le lieu du travail étaient retrouvés chez 68 ferblantiers (50,4 %). Les circonstances d'apparition étaient identifiées chez 27 personnes (exposition aux poussières

présentes dans l'atelier pour 23 personnes, lors de l'activation du feu de la forge pour 3 personnes ou lors de l'utilisation d'acide chlorhydrique pour 1 personne). Ces signes irritatifs disparaissaient pendant les vacances pour 45 personnes (66,2 %). La description des signes irritatifs des voies aériennes supérieures ou oculaires est présentée tableau 5.

Tableau 5 : Description des signes irritatifs des voies aériennes supérieures ou oculaires parmi les ferblantiers venus au centre Erasme, Cotonou, Bénin

Signes irritatifs survenant lors du travail	Nombre	%
Toux	24	17,8
Sifflements	9	6,7
Essoufflements	23	17,0
Éternuements à répétition	40	29,6
Congestion nasale	23	17,0
Rougeurs oculaires et picotements	37	27,4

3.2.3. Comparaison de l'état de santé des apprentis et des artisans ferblantiers

L'âge moyen des apprentis était de 15,5 années ($\pm 3,8$ années) et de 30,2 années ($\pm 10,1$ années) pour les artisans. L'âge au début de l'activité de ferblantier était significativement plus élevé chez les artisans (13,6 ans) que chez les apprentis actuellement employés dans les ateliers (11,9 ans) ($p=0,04$). Le niveau de scolarité des apprentis (80,6 % avaient été scolarisés dans le primaire) était plus élevé celui des artisans (47,1 % avaient été scolarisés dans le primaire) ($p<0,001$). La comparaison de l'état de santé des apprentis par rapport aux artisans ferblantiers est présenté tableau 6.

Tableau 6 : Comparaison de l'état de santé des apprentis par rapport aux artisans ferblantiers venus au centre Erasme, Cotonou, Bénin

Santé des ferblantiers	Apprentis		Artisans		p
	Nombre	%	Nombre	%	
Hypertension artérielle	3	9,7	34	32,7	0,01
Indice de masse corporelle					
Normal	29	93,5	66	63,5	0,003
Surpoids	2	6,5	27	26,0	
Obésité	0	0,0	11	10,6	
Vaccination antitétanique	2	6,5	30	28,8	0,01
Troubles de l'acuité visuelle	8	25,8	21	20,2	0,72
Troubles de l'audition					
Déficit auditif léger (25 à 39 dB)	21	67,7	53	51,0	0,18
Déficit auditif modéré (40 à 69 dB)	9	29,0	49	47,1	
Déficit auditif sévère (70 à 89 dB)	1	3,2	1	1,0	
Déficit d'au moins 35 dB sur la meilleure oreille	9	29,0	60	57,7	0,005
Atteinte bilatérale symétrique	21	67,7	86	82,7	0,07
Asthme	0	0,0	9	8,7	0,09
Signes irritatifs survenant lors de l'activité	12	38,7	56	53,8	0,13
Toux	5	16,1	19	18,3	0,78
Sifflements	1	3,2	8	7,7	0,38
Essoufflements	5	16,1	18	17,3	0,87
Eternuements à répétition	9	29,0	31	29,8	0,93
Congestion nasale	7	22,6	16	15,4	0,35
Rougeurs oculaires et picotements	5	16,1	32	30,8	0,11

P : significativité

4. Discussion

La population des apprentis ferblantiers a déjà été étudiée au Bénin (Tossou et al, 2001). L'absence de retour d'information des résultats de cette étude auprès de cette population aurait pu réduire l'adhésion des ferblantiers à notre étude. Pour limiter ces difficultés, plusieurs visites et des échanges avec les responsables des ateliers sur le site de Midombô ont été réalisés pendant près d'un an avant l'étude. Une relation de confiance s'est instaurée avec les artisans ferblantiers. Au total, 84 responsables d'ateliers des 102 ateliers du site de Midombô (82,4 %) ont accepté que nous réalisions une visite de leur lieu de travail et qu'une évaluation des conditions de travail aux différents postes soit effectuée. Par contre, la participation des ferblantiers à l'évaluation de leur état de santé a été faible puisque seulement 135 personnes sur les 251 travaillant dans les 84 ateliers (53,8 %) sont venues au centre de santé Erasme. Cette

faible participation concernait plus particulièrement les apprentis puisque seulement 31 apprentis sur 129 ont accepté de venir (24,0 %) alors que les maîtres artisans ont été plus concernés (85,3 %). L'âge et l'absence d'antécédents médicaux peuvent expliquer cette constatation. L'absence de suivi médical habituel et l'éloignement du centre de santé ont pu également constituer un frein à la participation à cette évaluation individuelle de santé des ferblantiers. Néanmoins, notre étude présente donc une bonne représentativité des ateliers des ferblantiers du site de Midombô, des maîtres artisans ferblantiers (85,3 %) mais reste limitée pour les apprentis du site.

4.1. Aspects socioprofessionnels

Parmi la population de ferblantiers ayant accepté de participer à cette étude, une majorité était des artisans ferblantiers (77,0 %), la participation des apprentis ayant été faible (31 sur 129). L'âge de début de l'activité de ferblantier était en moyenne de 13,2 ans ($\pm 4,6$ ans) mais certains avaient commencé le métier dès l'âge de 5 ans. Au Bénin, le travail des apprentis ferblantiers de moins de 18 ans est classé comme faisant partie des pires formes de travail des enfants compte tenu des risques pour la santé. En 2011, 31,5 % des enfants de 5 à 14 ans au Bénin travaillaient (U.S. Department of Labor's, 2012). L'âge au début de l'activité de ferblantier était significativement plus élevé chez les artisans (13,6 ans) que chez les apprentis actuellement employés dans les ateliers (11,9 ans). Cette tendance à travailler beaucoup plus tôt est liée à la pauvreté des ménages et les jeunes apprentis rejoignent rapidement leurs parents dans les ateliers pour contribuer à l'amélioration des revenus de la famille. Dans notre étude, le niveau de scolarité, avant le début de l'activité professionnelle, était pour la majorité le niveau primaire (74 soit 54,8 %) et 51 personnes n'avaient jamais été scolarisées (37,8 %). Les apprentis avaient un niveau de scolarité significativement plus élevé que les artisans. Ce résultat s'explique par les campagnes de sensibilisation contre le travail des enfants et les mesures de gratuité de l'école primaire mises en place au Bénin.

4.2. Conditions de travail des ferblantiers

Les travailleurs de l'économie informelle constituent la majorité de la main-d'œuvre de l'économie du pays et sont exposés à des niveaux de risques élevés, de par la précarité des outils et la pauvreté des acteurs (Volkoff et Thébaud-Mony, 2010). L'activité de ferblantier à Midombô consistait à la fabrication de nombreux accessoires en métal. Pour confectionner ces accessoires, les ferblantiers utilisent de nombreuses pièces constituées de métaux divers. Il existait des activités de découpe de plaques métalliques dans la quasi-totalité des ateliers (94,0 %) à l'aide

de cisailles ou de poinçons mais sans utilisation de procédé par oxycoupage. Il n'existe donc pas d'exposition à des fumées lors de cette activité. Des activités de brossage ou de polissage des pièces étaient retrouvées dans la moitié des ateliers, activités réalisées sans masque de protection respiratoire et pouvant exposer les ferblantiers aux poussières de métaux. Pour la fabrication des lampes à pétrole (16,7 % des ateliers), les boîtes de conserves recyclées sont étanchéifiées en utilisant un fer à souder et un alliage mélangeant du plomb et de l'étain. Cette méthode de soudage peut exposer les ferblantiers aux fumées de ces 2 métaux comme déjà mis en évidence lors de l'étude des conditions de travail en 2001 chez les apprentis ferblantiers (Tossou, 2001). Dans certains ateliers, des fils de fer issus de carcasses de pneus usagés sont utilisés. Cependant, la destruction des pneumatiques par le feu n'est pas réalisée sur le site de Midombô. L'utilisation de produits chimiques comme des peintures ou des solvants a été difficile à caractériser du fait du manque de traçabilité des produits et de l'absence d'étiquetage des bidons contenant ces produits chimiques. Pour les peintures, il s'agit le plus souvent de peinture anti rouille dont la composition chimique n'a pu être retrouvée. Aucun ferblantier ne portait de gants lors des activités de peinture ou lors de la manipulation de solvants.

Pour réaliser ces accessoires artisanaux, les ferblantiers utilisaient des outils rudimentaires principalement des marteaux, des poinçons, des burins ou des cisailles. La répétition des gestes lors de l'activité de martelage (présente dans 88,1 % des ateliers) ou de découpage (présente dans 31,0 % des ateliers) pourrait être à l'origine de survenue de troubles musculo-squelettiques au niveau des membres supérieurs. Dans une étude réalisée dans le secteur de la construction métallique au Nigéria, 39,3 % des travailleurs présentaient des TMS et les ouvriers travaillant le fer étaient les plus atteints au niveau des membres supérieurs (55,7 %) (Ekpenyong et Inyang, 2014). Les activités dans les ateliers, en particulier le martelage des pièces métalliques, génèrent du bruit. L'analyse des ambiances sonores dans l'ensemble des ateliers investigués a permis de mettre en évidence des niveaux sonores avec des niveaux de pression acoustique continue équivalente pondérée supérieurs à 85 décibels dans 58,3 % des ateliers et des niveaux de pression acoustique de crête supérieurs à 135 décibels dans 5 ateliers. Dans aucun atelier les ferblantiers ne portaient de bouchons atténuateurs de bruit ou de casque antibruit. Ces niveaux sonores retrouvés sont délétères pour l'audition de ces travailleurs et peuvent être à l'origine de déficit auditif sévère si les conditions d'exposition sans moyens de protection perdurent. Aucune réglementation au Bénin n'oblige les responsables d'ateliers de mettre à disposition des équipements de protection contre le bruit et encore moins de les faire porter. Dans une étude menée au Nigéria chez des travailleurs d'un laminoir en acier, les expositions sonores variaient

de 49 à 93 dB et étaient responsables de déficit d'audition (Ologe et al, 2006). A Cotonou, 44,6 % de la population active travaillent plus de 48 heures par semaine (INSAE, 2012). La durée du temps de travail dans les ateliers dans notre étude était en moyenne de 10 heures par jour, 6 jours par semaine avec une durée hebdomadaire du travail avoisinant les 60 heures. Cet excès de travail pourrait être la résultante de la précarité des emplois en termes de rémunération. Les apprentis travaillaient autant que les artisans mais leur charge de travail pouvait être supérieure dans la pratique car la répartition des tâches et les temps de pause étaient différents avec les artisans.

4.3. Etat de santé des Ferblantiers

L'exposition à des facteurs de risque comme les déchets issus du recyclage ou à des ambiances sonores bruyantes associées à des comportements à risque (alimentation, tabagisme) a des conséquences néfastes sur la santé des ferblantiers.

Dans les pays à faible revenu, l'accès des travailleurs du secteur informel aux soins de santé de qualité est souvent restreint. Le manque de fonds, la mauvaise qualité des soins et le manque de confiance vis-à-vis des mutuelles communautaires d'assurance maladie en sont des raisons majeures (Adebayo et al, 2015). L'évaluation de l'acuité visuelle a permis de détecter des troubles oculaires chez 29 personnes qui n'avaient jamais consulté un ophtalmologiste et qui n'étaient donc pas corrigées par le port de lunettes. La pression artérielle mesurée était élevée chez 37 personnes et aucune n'était traitée. L'indice de masse corporelle mesuré dans la population des ferblantiers et la fréquence de l'hypertension artérielle n'étaient pas différents de ceux retrouvés au Bénin dans la population générale urbaine (Houehanou et al, 2015). Cependant, les artisans ferblantiers étaient significativement plus souvent hypertendus et en surpoids que les apprentis. La fréquence du tabagisme était peu importante (3,0 %) et ne concernait qu'un seul apprenti. La fréquence habituelle de la consommation de tabac chez les hommes au Bénin varie selon les études entre 8 et 9 % (Sreeramareddy et al, 2014 ; Houehanou et al, 2015).

Concernant des effets possibles des risques professionnels sur la santé des ferblantiers, les conséquences des expositions aux bruits étaient les plus importantes. Suite aux mesures de bruits réalisées dans les ateliers, des niveaux sonores élevés étaient retrouvés dans plus de la moitié des ateliers. La réalisation d'audiométries a permis de mettre en évidence que la quasi-totalité des ferblantiers présentaient un déficit auditif. Les déficits auditifs étaient le plus souvent léger mais il existait déjà des atteintes modérées à sévères chez les apprentis. Les atteintes étaient bilatérales et symétriques signant une probable origine liée à des expositions répétées

lors des différentes activités en particulier le martelage des métaux. Plus de la moitié des artisans ferblantiers avait une perte d'au moins 35 décibels sur la meilleure oreille. Au vu des audiogrammes réalisés, il apparaît urgent de pouvoir mettre à disposition des protections individuelles contre le bruit à l'ensemble des ferblantiers. La mise à disposition de moyens de protection et la sensibilisation au port de ces protections permettraient de prévenir la détérioration de l'audition de ces travailleurs (Ologe et al, 2008 ; Singh et al, 2013). La présence de signes irritatifs des voies aériennes supérieures chez plus de la moitié des ferblantiers est le témoin d'une mauvaise qualité de l'air de l'environnement de travail. L'utilisation de forges à ciel ouvert et la combustion des coques de noix palmiste sont probablement à l'origine de pollutions des ateliers où se situent les forges mais doivent également polluer les ateliers contigus. Les concentrations en monoxyde de carbone mesurées dans les ateliers des ferblantiers chez les apprentis étaient élevées (Tossou, 2001). La disparition des symptômes lors des vacances est en faveur d'une origine liée à l'activité dans les ateliers.

4.4. Prévention

Les travailleurs du secteur informel, en particulier les ferblantiers au Bénin, sont soumis à des niveaux élevés d'exposition à de multiples risques pour la santé et l'utilisation d'équipements de protection est médiocre voire inexistante. Les règles élémentaires d'hygiène et de sécurité au travail ne sont pas respectées dans les ateliers. Les ateliers sont souvent encombrés par les déchets issus du recyclage pouvant être source d'accidents (chutes, coupures, ...). L'absence d'équipements de protection élémentaire comme des gants, de politique vaccinale contre le tétanos et de trousse de secours dans la totalité des ateliers témoignent des insuffisances par rapport aux différents risques spécifiques auxquels sont exposés les ferblantiers. Ces constatations justifient une amélioration des dispositions en matière de santé et de sécurité au travail (Tadesse et al, 2016).

Conclusion

L'activité de ferblantier dans le secteur informel au Bénin contribue à la satisfaction des besoins de la population. Néanmoins, cette activité exercée dans le secteur informel, génère des atteintes de la santé de ces travailleurs (artisans ferblantiers et leurs apprentis) qui peuvent être invalidantes dans le temps (déficit auditif en lien avec le bruit, survenue de troubles musculo-squelettiques en lien avec une usure prématurée par répétitivité des gestes). L'amélioration des conditions de travail nécessite, tout d'abord, de faire respecter la législation au travail en vigueur au Bénin, de la transposer dans le secteur informel et de développer des actions de sensibilisation

aux risques professionnels encourus par les travailleurs. Ces actions de prévention ne pourront être mises en place que s'il existe une volonté politique des autorités sanctionnée par des contrôles de l'inspection du travail. Elles devront être accompagnées par la Fédération nationale des artisans du Bénin et obtenir l'adhésion des responsables des ateliers et des ferblantiers.

Références

Adebayo EF, Uthman OA, Wiysonge CS, et al. A systematic review of factors that affect uptake of community-based health insurance in low-income and middle-income countries. *BMC Health Serv Res.* 2015;15:543.

Ayelo P, Baloïtcha P, Fayomi B. Situation socio sanitaire des apprentis en milieu artisanal à Cotonou. *J Int Santé Trav.* 2010;2:31-39.

Bacchetta M, Ernst E, Bustamante JP. Globalization and informal jobs in developing countries. International Labour Organization and World Trade Organization, Geneva, 2009, 212p.

Basu N, Ayelo PA, Djogbénu LS, et al. Occupational and Environmental Health Risks Associated with Informal Sector Activities-Selected Case Studies from West Africa. *New Solut.* 2016; 26(2):253-270.

Canagarajah S, Sethuraman SV. Social Protection and the Informal Sector in Developing Countries: Challenges and Opportunities. In: *Social Protection Discussion Paper Series n° 0130*, The World Bank, Washington, 2001, 90p.

Chen MA. The Informal Economy: Recent Trends, Future Directions. *New Solut.* 2016;26(2):155-172.

Ekpenyong CE, Inyang UC. Associations between worker characteristics, workplace factors, and work-related musculoskeletal disorders: a cross-sectional study of male construction workers in Nigeria. *Int J Occup Saf Ergon.* 2014;20(3):447-62.

Houehanou YC, Lacroix P, Mizehoun GC, Preux PM, Marin B, Houinato DS. Magnitude of cardiovascular risk factors in rural and urban areas in Benin: findings from a nationwide steps survey. *PLoS One.* 2015 ;10(5):e0126441.

Institut national de la statistique et de l'analyse économique du Bénin. Enquête modulaire intégrée sur les conditions de vie des ménages. 2^{ème} Edition (EMICoV 2011). Décembre 2012,

171p. Rapport_final_emicov_2011. <http://www.insae-bj.org/emicov.html> (accessed 14 november 2016).

Lucchini RG, London L. Global Occupational Health: Current Challenges and the Need for Urgent Action. *Ann Glob Health*. 2014;80(4):251-6.

Ologe FE, Akande TM, Olajide TG. Occupational noise exposure and sensorineural hearing loss among workers of a steel rolling mill. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2006;263(7):618-21.

Ologe FE¹, Olajide TG, Nwawolo CC, Oyejola BA. Deterioration of noise-induced hearing loss among bottling factory workers. *J Laryngol Otol*. 2008 ;122(8):786-94.

Singh LP, Bhardwaj A, Deepak KK. Occupational noise-induced hearing loss in Indian steel industry workers: an exploratory study. *Hum Factors*. 2013; 55(2): 411-24.

Sreeramareddy CT, Pradhan PM, Sin S. Prevalence, distribution, and social determinants of tobacco use in 30 sub-Saharan African countries. *BMC Med*. 2014. 18;12:243.

Tadesse S, Bezabih K, Destaw B, et al. Awareness of occupational hazards and associated factors among welders in Lideta Sub-City, Addis Ababa, Ethiopia. *J Occup Med Toxicol* 2016;11:15.

Theuri, CK. Small-scale enterprises and the informal sector in Kenya. *Afr Newslett on Occup Health and Safety*. 2012;22:32-34.

Tossou F. Évaluation des conditions de travail et de l'état de santé des enfants dans le secteur informel au Bénin: cas des apprentis ferblantiers de Cotonou. *Arch mal prof Env*. 2001;62(5) :385-387.

U.S. Department of Labor's, Bureau of International Labor Affairs. 2011 findings on the worst forms of child labor. Report required by the trade and development act of 2000. 2012, 786p.

Volkoff S, Thébaud-Mony A. Santé au travail : l'inégalité des parcours. In : Les inégalités sociales de santé. INSERM. La Découverte ; 2000. p. 349-61.

Deuxième partie des travaux

La deuxième partie de notre travail de recherche consistait à évaluer l'imprégnation sanguine en éléments métalliques dans la population des ferblantiers, en comparaison avec les concentrations observées dans la population masculine de Cotonou, non exposée professionnellement. Cette partie de l'étude a donc nécessité la mise en place d'une première enquête en population générale, chez les donneurs de sang à Cotonou avec la participation de l'Agence Nationale de Transfusion Sanguine du Bénin. Le profil de cette population générale, en ce qui concerne les concentrations sanguines en éléments métalliques a permis de proposer des valeurs de références à Cotonou. La liste des 29 métaux concernés par le screening en population générale était : Li (Lithium), Be (Béryllium), Mg (Magnésium), V (Vanadium), Cr (Chrome), Fe (Fer), Mn (Manganèse), Co (Cobalt), Cu (Cuivre), Zn (Zinc), As (Arsenic), Se (Sélénium), Sr (Strontium), Mo (Molybdène), Rh (Rhodium), Pd (Palladium), Cd (Cadmium), Sn (Étain), Sb (Antimoine), Ba (Baryum), Ce (Cérium), W (Tungstène), Pt (Platine), Hg (Mercure), Tl (Thallium), Pb (Plomb), Bi (Bismuth), U (Uranium). ; Al (Aluminium).

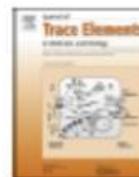
II.4. Article N°2 : Évaluation des concentrations sanguines en éléments métalliques en population générale



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Trace Elements in Medicine and Biology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jtemb



Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS

Brice Yedomon^{a,b,*}, Alain Menudier^c, Florence Lecavelier Des Etangs^c, Ludovic Anani^d, Benjamin Fayomi^b, Michel Druet-Cabanac^a, Christian Moesch^{a,c}

^aINSERM, U1094, Tropical Neuroepidemiology, Limoges, France

^bUnit of Teaching and Research in Occupational and Environmental Health, University of Abomey-Calavi, 01 BP 188 Cotonou, Benin

^cUniversity hospital of Limoges, Department of Pharmacology and Toxicology, F-87000 Limoges, France

^dNational Agency for Blood Transfusion of Benin, BP 386 Cotonou, Benin

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 August 2016

Received in revised form 25 October 2016

Accepted 4 November 2016

Keywords:

Benin

Biomonitoring

Blood donors

ICP-MS

Trace elements

Whole blood

ABSTRACT

This study aimed to investigate the blood concentration of 29 trace elements, metals or metalloids, in a healthy population of Cotonou not directly exposed to metals in order to propose reference values. Blood samples from 70 blood donors were collected in K2 EDTA tubes for trace elements during September 2015 and a questionnaire was used to assess lifestyle exposure. Blood metal concentrations were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) equipped with a quadrupole-based reaction cell. Among the selected blood donors 51.4% were aged from 18 to 36 years and 49.6% from 37 to 65 years. Among the 29 elements analyzed As, Pb, Mn, Pd, Sb, Co, Se, Sr showed blood concentrations higher than the reference values found in the literature for non-exposed healthy European populations and their geometric means were respectively 5.81; 47.39; 19.71; 1.91; 7.50; 0.66; 163.01; 30.53 $\mu\text{g/L}$. This study provides the first reference value (5th–95th percentiles) for each element in Cotonou, which enables us to carry out further investigations on environmental and occupational exposure.

© 2016 Elsevier GmbH. All rights reserved.

1. Introduction

Over the last twenty years, several studies have been conducted in Europe and particularly in developed countries to determine the usual biological concentrations of trace elements in the general population [1–7]. The determination of trace elements in whole blood presents increasing interest, as these values are important indicators of the health and are useful to assess the body burden of pollutants in non-exposed or occupational groups [8]. Among the methods used for the determination of heavy metals, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) is one of the most powerful tools capable of analyzing several different elements from the same sample with high analytical sensitivity.

Despite the growing number of biomonitoring studies on trace elements in the world, very few data are available concerning African countries. In Africa, urbanization, industrialization and fast population growth induce environmental pollution. Anthropogenic contamination is the main source of heavy metal pollution [9]. In Congo, Tuakuila et al., used ICP-MS spectrometry to show that urinary concentrations of trace elements from an urban area of Kinshasa were mostly higher than those found in rural areas or in the general population in other studies (American, Canadian, French or German) [10]. To our knowledge, apart from studies about blood lead level in semi-rural areas in Benin [11], no published studies have monitored the biological concentration of metals and metalloids in Benin's healthy general population.

The aim of this study was to determine the blood profile of 29 trace elements in a healthy general population of Cotonou (the economic capital of Benin) by ICP-MS to enable us to carry out further investigations.

* Corresponding author at: UMR Inserm 1094 NET, 2 rue du Dr Marcland, 87025 Limoges Cedex, France.

E-mail addresses: briceyedomon@yahoo.fr (B. Yedomon), alain.menedier@unilim.fr (A. Menudier), Florence.LECAVELIER@chu-limoges.fr (F.L.D. Etangs), ananily2002@yahoo.fr (L. Anani), bfayomi2@yahoo.fr (B. Fayomi), michel.druet-cabanac@unilim.fr (M. Druet-Cabanac), christian.moesch@unilim.fr (C. Moesch).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>
0946-672X/© 2016 Elsevier GmbH. All rights reserved.

Please cite this article in press as: B. Yedomon, et al., Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS, J Trace Elem Med Biol (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>



2. Materials and methods

2.1. Study population and sample collection

The population studied consisted of 70 healthy male blood donors, aged 18 to 65 years, and randomly selected using an *a priori* procedure with two exclusion criteria. Indeed people with a past or current occupational activity directly exposed to metals and those suffering from systemic diseases were not included. All the participants were of working age and spontaneous volunteers recruited at Cotonou's National Agency for Blood Transfusion. The study took place in September 2015 and authorization from the Ethics Committee of Benin's Institute of Applied Biological Sciences was obtained, as well as the participants' prior consent. A questionnaire was administered to obtain individual socio-anthropometric data about occupational activities (in an office or not), dietary habits (frequency of fish consumption and dietary supplements), traffic exposure, smoking habits and dental amalgams. Whole blood samples were collected in 6 mL plastic K2-EDTA (di-potassium ethylenediaminetetraacetic acid) containing tubes for trace elements (Vacutainer® Becton Dickinson, Le Pont du Clay, France) and carefully homogenized by manual agitation (8–10 inversions to ensure mixing of anticoagulant (EDTA) with blood). Within 2–3 h, blood samples were frozen at –20 °C until they were flown to Limoges University (in optimal conditions with dry ice). The analyses were performed at Limoges within University Hospital's Department of Pharmacology and Toxicology.

2.2. Instrumentation

All measurements were carried out with a triple quadrupole NexION® 3500 spectrometer (Perkin-Elmer, Courtaboeuf, France) equipped with an autosampler "ESI SC4 DX". The instrument features quadrupole-based Universal Cell Technology (UCT™), allowing the device to be run in three modes (standard, collision or reaction mode). Analyzes were performed in standard mode for 25 elements without any significant interference.

For arsenic ⁷⁵As, chromium ⁵²Cr, vanadium ⁵¹V and iron ⁵⁶Fe, the assays were run in reaction mode with high-purity (>99.995%) ammonia as the reaction cell gas (Air Liquide Santé, Nantes, France). A triple nickel cone interface and a quadrupole ion deflector permit a tightly focused ion beam. The spectrometer was monitored with software Syngistix™ for ICP-MS. The sample introduction system was consisted of a quartz cyclonic spray chamber and a glass Type C nebulizer. Plasma torch argon purity (Linde Healthcare, Saint-Priest, France) was higher than 99.999%. The analytical conditions were optimized daily to obtain the highest signal-to-background ratio for ⁹Be, ¹¹⁵In, ²³⁸U along with the ratios ¹⁴⁰Ce¹⁶O⁺/¹⁰⁴Ce⁺ < 2.5% and ¹⁴⁰Ce²⁺/¹⁴⁰Ce⁺ < 3.0%. Further ICP-MS operating conditions are summarized in Table 1. Sample preparation and analysis were performed in an ISO class 6 clean room.

2.3. Reagents

Ultrapure de-ionized water was obtained using a Milli-Q® Integral 5 water purification system (Millipore SAS, Molsheim, France). All reagents used were of analytical-reagent grade. Blood samples (100 µL) were diluted 1:51 (v/v) with an aqueous solution containing 0.01% (v/v) Triton® X-100 (Sigma-Aldrich, Saint Quentin Fallavier, France), 0.1 mg/L NH₄OH, 0.1 g/L EDTA and 5 mg/L *n*-butanol (Merck, Lyon, France). The 29 certified standards from SPEX CertiPrep® (Stanmore, UK) as well as four internal standards (⁴⁵Sc, ⁸⁹Y, ¹¹⁵In, ¹⁸⁷Re) were used to respectively ensure external calibration and correct for possible signal instabilities. To confirm the accuracy of the measurements, internal quality assessment

Table 1
Operating conditions for ICP-MS NexION® 3500.

Parameters	Settings
RF Plasma power	1600W
Nebulizer gas flow (Ar)	1.05 l/min
Auxiliary gas flow (Ar)	1.20 l/min
Plasma gas flow (Ar)	15.0 l/min
Reaction gas flow (NH ₃)	0.5 ml/min
Cell exit voltage	–3 V
Deflector and Detector voltage	–12 V
Sweeps per reading	20
Reading per replicate	1
Number of replicates	5
Detector mode	Dual
Scanning mode	Peak hopping
Integration time	1000 ms
Wash time	100 s

Seronorm™ Trace Elements Whole Blood controls were obtained from SERO AS (Billingstad, Norway).

2.4. Elemental analysis

The screening method used for analysis allowed the simultaneous determination of the 29 following elements in whole blood: ⁷Li (lithium), ⁹Be (beryllium), ²⁵Mg (magnesium), ²⁷Al (aluminum), ⁵¹V (vanadium), ⁵²Cr (chromium), ⁵⁵Mn (manganese), ⁵⁶Fe (iron), ⁵⁹Co (cobalt), ⁶³Cu (copper), ⁶⁴Zn (zinc), ⁷⁵As (arsenic), ⁸²Se (selenium), ⁸⁸Sr (strontium), ⁹⁸Mo (molybdenum), ¹⁰³Rh (rhodium), ¹⁰⁵Pd (palladium), ¹¹¹Cd (cadmium), ¹¹⁸Sn (tin), ¹²¹Sb (antimony), ¹³⁸Ba (barium), ¹⁴⁰Ce (cerium), ¹⁸⁴W (tungsten), ¹⁹⁵Pt (platinum), ²⁰²Hg (mercury), ²⁰⁵Tl (thallium), ²⁰⁸Pb (lead), ²⁰⁹Bi (bismuth), ²³⁸U (uranium). The use of DRC with ammonia as the reaction gas was only mandatory to remove the polyatomic interferences for arsenic ⁷⁵As (⁴⁰Ar³⁵Cl⁺), chromium ⁵²Cr (⁴⁰Ar¹²C⁺), vanadium ⁵¹V (³⁵Cl¹⁶O⁺) and ⁵⁶Fe (⁴⁰Ar¹⁶O⁺). According to the recommendations of the IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) and adapted from Boumans' method [12] the LOQs (Limits Of Quantification) were determined by plotting the % RSD (Relative Standard Deviation) of the net signal against the concentration. A linear regression applied to the log-log transformed (% RSDnet) plot enabled the determination of LOQ as equal to 5% of RSDnet [13].

Internal quality control was carried out during analysis thanks to Seronorm™ L-3 (reference 1112691) blood samples to ensure that the measured values were within the target ranges. Following every five blood samples, one Seronorm control sample was tested to ensure quality throughout screening. The accuracy of the method was also verified by participation in the QMEQAS external quality assessment scheme (Quebec Multielements External Assessment Scheme). Reference materials produced by Quebec's National Institute of Public Health of (Canada) were analyzed as external quality control. For each result submitted to the QMEQAS committee, a z-score was calculated from unrounded results. Z score values within the +2 to –2 range were satisfactory and indicated analytical accuracy.

2.5. Data analysis

For each element, the distribution was examined and the 5th, 50th and 95th percentiles were determined. The log-transformed values were used to calculate the geometric means. For this determination, individual results below the limit of quantification (LOQ) were replaced by the (LOQ/2) value. In this context, when more than 60% of the samples showed concentrations below LOQs, then the result was given as an estimate rather than a value (the reference values proposed are only indicative, as below the LOQ).

Table 2
Whole blood results obtained with QMEQAS-certified reference material (Quebec Multielement External Quality Assessment Scheme) and Seronorm internal control.

Element	Units	QMEQAS 2015–02 External control				Seronorm L-3 Internal control		
		Target Value	Measured	Z - Score	Range	Acceptable range (µg/L)	Mean	Standard deviation
⁹ Be	µmol/L	1.41	1.45	0.23	[1.02–1.80]	10.0–15.0	10.37	0.47
²⁷ Al			na	na		84.0–126.0	92.35	13.19
⁵¹ V	nmol/L	20.20	14.90	–1.41	[12.7–27.7]	4.6–6.8	5.63	0.21
⁵² Cr	nmol/L	61.30	39.00	–1.70	[35.1–87.5]	18.5–27.9	22.98	0.80
⁵⁵ Mn	nmol/L	309.00	362.00	1.40	[233.0–385.0]	37.8–56.8	38.61	12.94
⁵⁹ Co	nmol/L	43.20	39.50	–0.73	[33.2–53.2]	10.2–12.6	11.19	0.17
⁶³ Cu	µmol/L	54.20	53.50	–0.25	[48.2–60.2]	2220.0–2720.0	2294.51	50.30
⁶⁴ Zn	µmol/L	85.20	71.90	–1.67	[69.3–101.0]	7280.0–10940.0	7459.54	146.99
⁷⁵ As	nmol/L	266.00	247.00	0.56	[191.0–341.0]	23.1–37.7	31.19	0.46
⁸⁷ Se	nmol/L	5.24	4.90	–0.67	[4.2–6.3]	217.0–327.0	234.02	4.95
⁸⁸ Sr	nmol/L	248.00	229.00	–0.72	[196.0–300.0]	na	na	na
⁹⁸ Mo	nmol/L	74.00	67.40	–0.77	[56.8–91.2]	6.0–9.0	6.72	0.24
¹¹¹ Cd	nmol/L	26.60	22.20	–1.61	[21.2–32.0]	10.8–13.4	9.81	0.26
¹¹⁸ Sn	nmol/L	76.80	77.00	0.02	[56.3–97.3]	7.8–11.8	10.62	0.25
¹²¹ Sb	nmol/L	79.90	81.10	0.16	[64.6–95.2]	17.9–26.9	23.23	0.51
¹³⁸ Ba	nmol/L	13.10	10.00	–1.15	[7.8–18.4]	na	na	na
¹⁶⁶ Pt	nmol/L	9.39	8.82	–0.48	[7.0–11.8]	na	na	na
²⁰² Hg	nmol/L	1010.00	946.00	–0.60	[797.0–1220.0]	29.6–44.6	30.55	0.54
²⁰⁶ Tl	nmol/L	32.70	30.80	–0.89	[28.5–36.9]	27.2–41.0	88.81	1.98
²⁰⁸ Pb	µmol/L	0.86	0.79	–1.16	[0.7–0.9]	401.0–493.0	406.16	10.04
²⁰⁹ Bi	nmol/L	50.70	43.00	–1.48	[40.3–61.1]	46.0–69.2	53.09	1.25
²³⁸ U	nmol/L	1.60	1.80	2.00	[1.3–1.9]	na	na	na

na: not attributable.

non-parametric Mann-Whitney *U* test was used for comparison of different groups (based on age group, fish consumption frequency, car driving or not, white-collar work or not, dental amalgams or not) and the differences were considered to be significant when $p < 0.05$. Data were analyzed with SPSS.20 software [14].

3. Results

3.1. Population characteristics

According to our questionnaire, the mean age was 37.8 years (± 11.4) while the median one was 36.4 years. Among the blood donors, 51.4% were aged 18 to 36 and 49.6% 37 to 65 years. As they were all over 18-years-old they were likely to have an occupation not directly exposed to metals. All the participants were nonsmokers and consumed fish or seafood on average 5.6 times per week (± 1.8). Only one reported to be vegetarian (no fish consumption). Three participants (4.3%) mentioned dental amalgams. As regards traffic exposure 15.7% reported being car drivers versus 84.3% who used their own motor bike or a motorcycle taxi. Considering the type of work, 52.9% were classified as white-collar workers (working in an office setting).

3.2. Quality assurance

Accreditation of the laboratory according to the approved NF ISO 15189: 2012 international standard [15] ensured the technical competence and the existence of a management system of suitable quality. Table 2 shows 22 elements with results for reference materials (internal or external control). The following trace elements (Li, Fe, Mg, Rh, Pd, Ce, and W) are not mentioned in Table 2 as they were not proposed in the external QMEQAS controls and their Seronorm controls acceptable ranges were not certified by the suppliers. As we can see, the QMEQAS external control (Comparison Program from the National Institute of Public Health of Quebec in 2015 – February), was used and the Z score obtained (± 2) indicate that our external quality control was satisfactory. For the internal Seronorm controls, the acceptable range limits were set by the control material supplier. The mean values measured for the Seronorm samples and standard deviation are shown in Table 2. The compar-

ison between target values and measured values shows sufficient agreement for internal quality control assurance.

3.3. Sample analysis

The results for trace element levels in whole blood for our study population are summarized in Table 3. Sixteen elements (Mg, Fe, Mn, Co, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Rh, Cd, Sb, Hg, Tl, Pb) showed 100% of measured values above the LOQs. For 11 trace elements (Be, V, Cr, Rh, Sn, Ce, W, Pt, Ti, Bi, U), the geometric mean ranged from less than 0.001 to 0.2 µg/L. For six trace elements (V, Cr, Ce, W, Pt, and Bi), very low background levels were found (63 to 89% of their values were below the LOQs). The Reference Values (RV) proposed for these elements are indicative, respectively: (V, RV < 0.1 µg/L), (Cr, RV < 0.24 µg/L), (Ce, RV < 0.010 µg/L), (W, RV < 0.002 µg/L), (Pt, RV < 0.001 µg/L), (Bi, RV < 0.010 µg/L).

For seven other trace elements (Li, Be, Al, Pd, Sn, Ba, U) 4% to 36% of the measured values were below the limit of quantification.

4. Discussion

In Africa, very few studies aiming to determine the concentrations of trace elements in whole blood have been carried out by ICP-MS because of the scarcity of equipment, high cost analyses and pre analytical considerations. The population surveyed in this study is an urban population of a seaport (Cotonou), located on the Atlantic seaside and crossed by a lagoon. This geographical location is a special situation in terms of eating habits.

4.1. Pre-analytical and analytical considerations

A great deal of attention was paid to the pre-analytical and analytical conditions. The use of specific tubes for trace elements (polyethylene terephthalate tubes) allowed to reduce the risks of metallic contamination (by sustained release) found with the glass tubes [16]. However as already noted by some authors, a sporadic contamination by manganese, cobalt or chromium may occur, caused by the stainless steel venepuncture needles [17,18]. The implementation of the cold chain allowed to guarantee the preser-

Please cite this article in press as: B. Yedomon, et al., Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS, J Trace Elem Med Biol (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>



Table 3
Whole blood ICP-MS statistical data about 29 elemental concentrations in 70 volunteer blood donors.

Elements	LOQ	Mean arithmetic (µg/L)	Geometric mean ^a (µg/L)	% <LOQ	Percentiles		
					5%	50%	95%
⁷ Li	0.100	0.474	0.401	4.3	0.120	0.466	0.850
⁹ Be	0.010	0.048	0.020	34.0	<0.010	0.020	0.196
²⁵ Mg	1.000	27858.0	27691.0	0.0	23421.0	27638.0	34050.0
²⁷ Al	0.410	3.726	1.411	36.0	<0.410	1.932	10.040
⁵¹ V	0.100	<0.098	<0.098	83.0	<0.100	<0.098	0.160
⁵² Cr	0.240	0.325	<0.240	63.0	<0.240	<0.240	0.990
⁵⁶ Fe	24.500	472457.0	468704.0	0.0	386861.0	476011.4	553716.0
⁵⁵ Mn	0.100	19.936	19.711	0.0	15.700	19.215	25.140
⁵⁹ Co	0.010	0.747	0.673	0.0	0.360	0.653	1.300
⁶³ Cu	0.240	874.925	870.000	0.0	720.0	873.4	1027.0
⁶⁴ Zn	2.150	4937.580	4845.446	0.0	3684.0	4862.6	6668.0
⁷⁵ As	0.020	6.126	5.810	0.0	3.520	5.703	10.550
⁸² Se	0.100	165.378	163.013	0.0	123.0	163.4	205.0
⁸⁸ Sr	0.010	31.792	30.531	0.0	21.170	30.691	48.420
⁹⁸ Mo	0.010	1.205	0.912	0.0	0.370	0.814	3.160
¹⁰¹ Rh	0.001	0.044	0.044	0.0	0.032	0.044	0.053
¹⁰⁶ Pd	0.500	1.563	1.027	26.0	<0.500	1.365	3.790
¹¹¹ Cd	0.020	0.356	0.319	0.0	0.150	0.331	0.630
¹¹⁸ Sn	0.100	0.257	0.211	9.0	<0.100	0.239	0.480
¹²¹ Sb	0.100	7.536	7.500	0.0	6.280	7.416	8.940
¹³⁸ Ba	0.240	0.433	0.309	39.0	<0.240	0.326	0.990
¹⁴⁰ Ce	0.010	<0.010	<0.010	79.0	<0.010	<0.010	0.030
¹⁸⁶ W	0.002	<0.002	<0.002	63.0	<0.002	<0.002	0.143
¹⁹⁵ Pt	0.001	<0.001	<0.001	66.0	<0.001	<0.001	0.005
²⁰³ Hg	0.020	3.762	3.120	0.0	1.110	3.279	7.640
²⁰⁵ Tl	0.001	0.142	0.123	0.0	0.060	0.129	0.270
²⁰⁸ Pb	0.100	49.487	47.390	0.0	29.370	47.734	74.780
²⁰⁹ Bi	0.010	<0.010	<0.010	89.0	<0.010	<0.010	0.015
²³⁸ U	0.001	0.004	0.002	21.0	<0.001	0.004	0.008

^a Concentrations below the limit of quantification (LOQ) are replaced by the LOQ/2 value in order to calculate the geometric mean.

vation of the samples from their sampling in Benin up to their analysis in Limoges University, France.

As mentioned by Hall et al., oxygen (O₂) can be used as a reagent rather than ammonia, for blood arsenic determination [19]. However, our results for arsenic determination using ammonia as a reagent was correct regarding the results of the external QMEQAS quality controls (Table 2). For selenium determination, the most abundant isotope, ⁸⁰As (49.8% natural abundance) showed major interference with Ar₂ dimer (m/z = 80). However, blood selenium can be measured accurately in standard mode at mass 82 and in reaction mode at mass 78. In our method, we determined the ⁸²Se isotope in standard mode [20]. The ¹¹¹Cd isotope was chosen over the more abundant ¹¹⁴Cd to avoid potential isobaric interference from ¹¹⁴Sn. Judging from the external QMEQAS quality controls (Table 2), the potential polyatomic interference (⁸⁵Mo¹⁶O) does not require using the reaction mode for this element. For palladium we chose to analyze the most abundant (22.23%) free isotope ¹⁰⁵Pd. However this element can present polyatomic interferences (⁶⁵Cu⁴⁰Ar; ⁸⁹Y¹⁶O; ⁸⁸Sr¹⁷O; ⁸⁸Sr¹⁶O¹H) which could increase the signal measured at m/z = 105 [21]. Feasible ways are shown to reduce these interferences [22]. As the expected values pose a challenging tasks to the analyst, the assessment of reference values for this metal is problematic. For elements which are present in very low concentrations in biological fluids, such as platinum, it would be worth using Sector Field Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry as it offers better detection power and sensitivity [22].

The participation in inter-laboratories trials and the use of internal Seronorm control before and after every series of 5 samples permitted to guarantee the accuracy of our results (see Table 2).

4.2. General observations

We found a positive association between age, fish consumption and Cu, Se, and Hg blood levels. In the group the over 37-year-

olds (79.4%) consume fish more than 4 times per week while only (50%) of the under-37 s usually consume fish. Significantly higher blood levels for copper (Cu, p = 0.014), selenium (Se, p = 0.011), and mercury (Hg, p = 0.002) in the over-37 year-olds could be explained by the cumulative and additional exposure to these elements due to their almost daily fish consumption. Moreover, considering age groups, significantly higher levels were found for cadmium (Cd, p = 0.007), and thallium (Tl, p = 0.02).

The results according to age groups and socio-professional categories of our study sample are representative of Cotonou's 18-to-65 year-old male population [23]. Considering age groups, significantly higher levels were found. Significant difference (p = 0.035) was found for mean cadmium concentration in blood, between white-collar workers (0.3 µg/L ± 0.12) and blue-collar workers (0.4 µg/L ± 0.2). As for traffic exposure, the car drivers (mainly people ≥ 37 years) had a blood mercury level twofold that of motorbike drivers (6.8 ± 4.1 µg/L versus 3.19 ± 1.6 µg/L). As people with dental amalgam were very few (<5%), no further statistical analyses were attempted for this group. For all the other trace elements analyzed, no significant differences were found according to age, socioprofessional job or traffic exposure. Some studies have been conducted on manganese and blood lead in South Africa [24,25] and sub-Saharan Africa [26], as well as among post-partum women in Benin. The Table 4 compares the results of our study with those in the literature (geometric mean, 5th to 95th percentiles).

4.3. Essential elements

The essential elements are naturally present in the body. Biomonitoring of these essential elements presents an interest since their deficit or their excess in the body can be responsible for diseases [27]. Concerning manganese, cobalt and palladium, the geometric means found are above the 95th percentiles found in the other studies carried out in unexposed and healthy general popu-

Please cite this article in press as: B. Yedomon, et al., Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS, J Trace Elem Med Biol (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>

Table 4

Comparison between Cotonou's population and other studies for essential trace elements in whole blood (expressed in $\mu\text{g/L}$) from non-occupationally-exposed population.

Reference	Country	n	Parameter	Mn	Se	Cu	Zn	Co	Pd
Our study	Benin	70	GM (5th–95th)	19.7 (15.7–25.1)	163 (123–205)	870 (720–1027)	4845 (3684–6668)	0.67 (0.36–1.30)	1.02 (<0.5–3.79)
[36]	Brazil	890 males	GM (5th–95th)	12.8 (6.1–28.4)	–	–	–	–	–
[37]	Congo	100 children	(5th–95th)	(5.7–22.2)	(85–136)	(900–1700)	(3400–6900)	–	–
[6]	Germany	130	GM (5th–95th)	8.6 (5.7–14.6)	132 (105–164)	1020 (804–1620)	–	<0.14 (0.05–0.41)	0.01 (<0.02–0.029)
[3]	France	100	(5th–95th)	(5–12.8)	(89–154)	–	–	(0.04–0.64)	(0.01–0.71)
[35]	Italy	104 males	GM (5th–95th)	8.0 (4.6–14.2)	141.00 (111–185)	957 (769–1200)	6804 (5056–8956)	–	–
[34]	USA	–	Reference	(4–15)	–	–	–	–	–

n: numbers of subjects in the study; GM: geometric mean.

lations. Thus, for these three elements, the reference values in the Beninese population are above the usual values known in the literature (See Table 4). For selenium, copper and zinc, the results found are within the literature's reference limits, but selenium concentrations are close to the 95th percentile found in other studies, when copper and zinc levels are close to the 5th percentiles (see Table 4).

Se (Selenium): It is an essential nutrient necessary for good health with the particularity of having a relatively narrow range of consumption. Inorganic selenium consumed through drinking water could be toxic. Epidemiological studies reassessing the safe upper limit in drinking water suggest reduction to $1 \mu\text{g/L}$ in order to adequately protect human health [28]. According to the reference values of selenium in drinking water proposed by the European Union (below $10 \mu\text{g/L}$) and as recommended by recent epidemiologic studies, the selenium concentration in tap water in Cotonou is less than $0.25 \mu\text{g/L}$ [29]. A correlation was found between blood selenium concentration ($p=0.0004$) and fish consumption frequency. Indeed, as mentioned by Fox et al., fish represents one of the main dietary selenium sources due to the bioavailability of this element in the flesh of fish [30]. Our results are similar to those obtained in a group of electronic waste recycling workers in Agbogboshie (Ghana) (mean = $164 \pm 49 \mu\text{g/L}$ in Ghana versus $165 \pm 28 \mu\text{g/L}$) [31], suggesting that higher blood selenium levels could be specific to the West African coastal towns. In addition, the Maize paste (owo) which is one of the daily most common grain preparation could be another source of dietary selenium in urban adults in Benin, as mentioned in a study in Malawi [32,33].

Mn (Manganese): Concerning blood manganese, a single sample in our study was within the reference limits proposed by the Agency for Toxic Substances ($4–15 \mu\text{g/L}$) [34]. Our results (Geometric mean = $19.71 \mu\text{g/L}$) were higher than those obtained in an Italian study ($8.01 \mu\text{g/L}$) [35] or in a German study ($8.6 \mu\text{g/L}$) [6], but comparable to those obtained in a recent study in Brazil (see Table 4). The authors of the latter study concluded that the blackskinned and non-smoking people of this country might have blood manganese above $17.88 \mu\text{g/L}$ [36]. In Congo, concentrations from 5.7 to $22.2 \mu\text{g/L}$ (5th–95th percentiles) were found for children younger than 6 months-old [37]. In Nigeria (located east of Benin), high manganese concentrations were also found ($28 \mu\text{g/L}$) in healthy adults and could be due to high manganese contents in the soil of this region [38]. In Benin, the analysis of atmospheric fine particles in Cotonou in 2010 showed values superior to those set by the World Health Organization in the ambient air of Cotonou. The concentrations in manganese in the ambient air were on average 68 ng/m^3 [39,40] and superior to those found in Canada ($7–19 \text{ ng/m}^3$) [41]. Environmental pollution, air erosion of dusts or soil pollution contributes to human manganese exposure via inhalation and are factors associated to a high rate of blood manganese [36,42]. Except these environmental risks, a sporadic contamination due to the stainless steel venepuncture needles cannot be excluded [17].

Zn (Zinc): Our results concerning zinc (geometric mean: $4845 \mu\text{g/L}$) were low compared to those found in Bocca's Italian study [35], but still within the usual values (5th to the 95th percentiles) suggested in Goullé's French study [3]. The low values observed in our study could be explained by a low-zinc food supply, just as it has been shown that sub-Saharan Africans [43] and children in a rural area of Northern Benin may present this type of deficiency because of a low zinc supply compared to physiological needs [44].

Mo (Molybdenum): With variations from one author to another, the reference range (5–95th percentiles) proposed for Mo is ($1.02–6.03 \mu\text{g/L}$) in the Italian population [1], and ($0.78–1.13 \mu\text{g/L}$) for the (25th–75th percentiles) in the Swedish population [7]. These values are close to the values measured in our study (5–95th percentiles) ($0.37–3.1 \mu\text{g/L}$). Molybdenum concentrations in air are higher in urban areas than in rural areas. In Cotonou, molybdenum levels in drinking water are within acceptable ranges ($<0.7 \mu\text{g/L}$) [29], and the concentration of molybdenum in sea water is approximately 0.01 mg/L [45]. These observations suggest that the molybdenum concentration in blood could be related to the geographical location of Cotonou and the exposure to ambient air, soil, or legumes.

Co (Cobalt) and Pd (Palladium): These two essential elements show respective geometric mean concentrations of 0.67 and $1.02 \mu\text{g/L}$ which are above the usual values found in the European studies (see Table 4). For palladium, the high level found in our study could come from the polyatomic interferences, as mentioned in the sub chapter Pre-analytical and analytical considerations. For cobalt, no particular exposure seems to explain the observed difference.

4.4. Toxic trace elements

Metal pollution in Benin represents a particular environmental problem and numerous works have been led about anthropogenic pollution. Atmospheric pollution, spraying-waters, and ground pollutants can reach sufficient levels to contaminate the species consumed by people (fish and vegetables) [9,46,47]. In our study the average blood concentrations in lead, arsenic, strontium, mercury were within the normal range, but tended towards the upper limits (95th percentiles) found in the literature (Table 5). Blood cadmium alone showed values very similar to those found in the literature for the non-smokers.

Pb (Lead): The average blood lead level in our study ($49.5 \mu\text{g/L}$) was comparable to those obtained among 225 Beninese mothers (mean = $51.4 \mu\text{g/L}$) [11], but slightly higher than those found in the study of Heitland [6] and Goullé [3] in German and French populations respectively (see Table 5). Air pollution in Cotonou comes from transport, waste and industries combined. In addition to this baseline exposure we noted that – the ban on leaded gasoline in

Table 5
Comparison between Cotonou's population and other studies for toxic trace elements in whole blood (expressed in $\mu\text{g/L}$) from non-occupationally-exposed population.

Reference	Country	n	Parameter	As	Hg	Pb	Cd	Sr	Sb
Our study	Benin	70	GM (95th) percentiles	5.81 (10.55)	3.12 (7.64)	47.39 (74.78)	0.32 (0.63)	30.53 (48.42)	7.50 (8.94)
[11]	Benin	225 Mothers	(5th–95th) percentiles	–	–	(36.50–60.10)	–	–	–
[36]	Brazil	890 Males	GM (95th) percentiles	4.25 (9.61)	–	–	0.08 (0.83)	–	–
[40]	Tunisia	350	(5th–95th) percentiles	0.01–6.79	–	–	0.01–2.31	–	–
[6]	Germany	130	(5th–95th) percentiles	0.16–2.3	0.2–3.3	8–47	0.12–1.9	11–39	<0.013–0.04
[3]	France	100	(5th–95th) percentiles	2.6–17.8	0.94–8.13	11.4–62.8	0.15–2.04	9–41	0.05–0.13
[1]	Italy	110	(5th–95th) percentiles	–	1.57–14.50	12.80–79.50	0.25–1.57	–	–
[50]	Canada	2576 Males	GM (95th) percentiles	–	0.68 (5.60)	15.0 (42.0)	0.30 (3.40)	–	–

n: number of subjects in the study; GM: geometric mean.

France and Germany before the 2000s, contributed to lower the lead induced atmospheric pollution, but in Benin this ban occurred only in 2005: – the Convention on the prohibition of white lead in paint adopted in Geneva on October 1921, was not ratified by Benin until December 1960, while in France this rule has been implemented since 1948. Then the relatively high concentration found in Cotonou's population could be related to environmental pollution and to the consumption of lead-contaminated food [46–48].

As (Arsenic): The result for blood arsenic in our study (5.70 $\mu\text{g/L}$) was higher than the average found in a study in Germany [6]. However it should be highlighted that this geometric mean in the Beninese population remains within the acceptable limits in comparison to the French [3], Tunisian [49] and Brazilian [36] studies (see Table 5).

Sb (Antimony): The mean blood concentration in our study (7.5 $\mu\text{g/L}$) was much higher than that observed in Heitland's study (Table 5) [6]. Due to the density of the traffic in Cotonou city, environmental pollution coming from the fallout particles emitted into the atmosphere by planes, car and motorbike admittedly reaches vegetation and soils [50,51]. As antimony is mostly emitted as oxides from traffic and could easily concentrate in diverse vegetables before being ingested [52], the higher levels found in our study could be related to environmental pollution. However, the few studies conducted on antimony in the environment in Benin do not allow us to identify exposure risks with greater certainty.

Sr (Strontium): The geometric mean for blood strontium in our study was 30.53 $\mu\text{g/L}$, which is almost twofold that found in the German population (19 $\mu\text{g/L}$) [6]. However, if the (5th to 95th percentiles, 21–48 $\mu\text{g/L}$) values are considered as reference values, our result is consistent with the limits suggested by Heitland's study in Germany [6], Alimonti's in Italy [1] and Goullé's in France [3]. Strontium is widely distributed in the earth's crust and oceans and is considered as having a low toxicity. Small amounts of strontium are ubiquitous in the environment and humans can be exposed through the inhalation of aerosols and the ingestion of food (vegetables or fish) and drinking water [53].

Hg (Mercury): The regular consumption of fish and other sea products is responsible for an increase in the blood content in mercury as shown in Wilhem's study [5]. In our study, people who consume fish more than 4 times per week ($N=45$) show higher blood mercury than people who consume it less than 4 times (mean = 4.07 $\mu\text{g/L}$ versus 3.16 $\mu\text{g/L}$). For all participants, the geometric mean for blood mercury (3.12 $\mu\text{g/L}$) was lower than the 95th percentile found in German, French, Italian and Canadian studies (see Table 5). Regarding road traffic exposure, we noticed that the mercury level in the blood of those who reportedly rode by car (6.8 $\mu\text{g/L} \pm 4.1$) was significantly different ($p=0.0012$) from that of those who did not travel by car (3.2 $\mu\text{g/L} \pm 1.6$). After analysis it was found that age played an important role in this result because the oldest had higher rates of blood mercury and were also mostly car-owners.

Cd (Cadmium): We found a significant higher level in the elderly participants (Cd, $p=0.007$). As our study participants were non-

smokers, this situation could be related to the cumulative nature of cadmium [54] and exposure via food consumption. As noted by Koumoliou et al., there is a potential risk of exposition to this toxic through regular consumption of vegetables in Benin [46]. However the geometric mean in our study (0.32 $\mu\text{g/L}$), was within the reference values proposed in a review study by Herber et al. (below 0.8 $\mu\text{g/L}$) for white-collar workers [55] and similar to the geometric mean found for non-smokers, in studies by Becker et al. (0.28 $\mu\text{g/L}$) and Heitland et al. (0.29 $\mu\text{g/L}$) [6,56].

Be (Beryllium): The geometric mean found in our study was (GM = 0.02 $\mu\text{g/L}$) versus (GM < 0.03 $\mu\text{g/L}$) in a French study [57] and (GM < 0.008 $\mu\text{g/L}$) in a German study [6]. The general population is exposed to trace amounts of beryllium through inhalation of air, cigarette smoke and ingestion of drinking water and food. One of the major anthropogenic emission sources for the environment is the combustion of coal which releases particulates and fly ash that contain beryllium into the atmosphere [58]. As the participants were no smokers and beryllium in drinking water in Cotonou was within the low range (<0.125 $\mu\text{g/L}$), this study suggests the possible involvement of other sources of beryllium described in the literature like the use of charcoal for cooking or food contamination. There are no data on exposure to this metal in the general population in Benin.

4.5. Perspectives and limitations of the study

This study will serve as a reference to identify specific at-risk groups for occupational and environmental exposure in the general population. These reference data (5th–95th percentiles), however, remain limited to the 18–65 year-old male population in Cotonou, representing a first stage in the determination of reference values. The limited number of participants did not allow to highlight the cumulative effect of certain toxic metals such as lead. From this study in Cotonou, it will from now on be possible to detect occupational exposures earlier by comparing certain toxic trace element concentrations with the 95th percentile values of the present study. Furthermore, among the essential trace elements presented in this study, it will now be possible to identify the deficiencies in essential trace elements poorly known (when the values found are lower than the values of the 5th percentiles).

5. Conclusion

Among the 29 elements analyzed, three essential trace elements (manganese, cobalt and palladium) had blood concentrations higher than the reference values found in the literature for non-exposed healthy populations. For toxic trace elements, the mean blood levels for arsenic, mercury, lead, and strontium were within the normal range proposed by other studies, but tended towards the upper limits (95th percentile) found in the literature. Some differences in trace elements reference blood level could be due to environmental pollution and eating habits. This study provides the first reference values for trace elements in Cotonou, which enables

Please cite this article in press as: B. Yedomon, et al., Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS, J Trace Elem Med Biol (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>



us to carry out further investigations on environmental and occupational exposure. For the next biomonitoring studies on Cotonou's male population, the measures equal to or above the 95th percentile should be considered as indicators of exposure.

Acknowledgements

This investigation was funded within the financial support of the Région du Limousin, the Limoges University and the Faculty of Health Sciences of Cotonou. The authors are grateful to all the team of ANTS in Cotonou (National Agency for Blood Transfusion). The authors would like to thank Sylvie Gautier for proofreading this paper.

References

- [1] A. Alimonti, B. Bocca, E. Mannella, F. Petrucci, F. Zennaro, R. Cotichini, C. D'ippolito, A. Agresti, S. Cairni, G. Forte, Assessment of reference values for selected elements in a healthy urban population, *Ann. Dell'Istituto Super. Sanità* 41 (2005) 181–187.
- [2] P. Coelho, S. Costa, C. Costa, S. Silva, A. Walter, J. Raville, M.R. Pastorinho, C. Harrington, A. Taylor, V. Dall'Armi, R. Zoffoli, C. Candias, E.F. da Silva, S. Bonassi, B. Laffon, J.P. Teixeira, Biomonitoring of several toxic metal(loid)s in different biological matrices from environmentally and occupationally exposed populations from Panasqueira mine area Portugal, *Environ. Geochem. Health* 36 (2013) 255–269.
- [3] J.-P. Goullé, L. Mahieu, J. Castermant, N. Neveu, L. Bonneau, G. Laine, D. Bouige, C. Lacroix, Metal and metalloid multi-elementary ICP-MS validation in whole blood plasma, urine and hair. Reference values, *Forensic Sci. Int.* 153 (2005) 39–44.
- [4] G. Forte, R. Madeddu, P. Tolu, Y. Asara, J.A. Marchal, B. Bocca, Reference intervals for blood Cd and Pb in the general population of Sardinia (Italy), *Int. J. Hyg. Environ. Health* 214 (2011) 102–109.
- [5] M. Wilhelm, U. Ewers, C. Schulz, Revised and new reference values for some trace elements in blood and urine for human biomonitoring in environmental medicine, *Int. J. Hyg. Environ. Health* 207 (2004) 69–73.
- [6] P. Heitland, H.D. Klöster, Biomonitoring of 37 trace elements in blood samples from inhabitants of northern Germany by ICP-MS, *J. Trace Elem. Med. Biol.* 20 (2006) 253–262.
- [7] B. Schultze, P.M. Lind, A. Larsson, L. Lind, Whole blood and serum concentrations of metals in a Swedish population-based sample, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 74 (2014) 143–148.
- [8] O. Vesterberg, L. Alessio, D. Brune, L. Gerhardsson, R. Herber, G. Kazantzis, G.F. Nordberg, E. Sabbioni, International project for producing reference values for concentrations of trace elements in human blood and urine-TRACY: Scand. J. Work. Environ. Health 19 (Suppl. 1) (1993) 19–26.
- [9] M.A. Olade, Heavy Metal Pollution and the Need for Monitoring: Illustrated for Developing Countries in West Africa, (1987). http://dge.stanford.edu/SCOPE/SCOPE_11/SCOPE_11_2.15/Chapter20_335-341.pdf (accessed 02.02.16).
- [10] J. Tuakula, D. Lison, A.-C. Lantin, F. Mbuyi, G. Deumer, V. Hautroid, P. Hoet, Worrying exposure to trace elements in the population of Kinshasa, Democratic Republic of Congo (DRC), *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 85 (2012) 927–930.
- [11] F. Bodeau-Livinec, P. Clouet, M. Cot, P. Dumas, S. Durand, A. Massougboji, P. Ayotte, B. Le Bot, Elevated blood lead levels in infants and mothers in Benin and potential sources of exposure, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13 (2016).
- [12] P. Bosmans, Measuring detection limits in inductively coupled plasma emission-spectrometry using the sbt-Rsb approach. I. A tutorial discussion of the theory, *Spectrochim. Acta Part B* 46 (1991) 431–445.
- [13] C. Bonnefoy, A. Menudier, C. Moesch, G. Lachatre, J.-M. Memmet, Validation of the determination of lead in whole blood by ICP-MS, *J. Anal. Spectrom.* 17 (2002) 1161–1165.
- [14] C. University, Introduction to Statistical Analysis Using SPSS 20, (13:55:12.0). <http://www.cf.ac.uk/insev/educationandtraining/training/sp1.html> (accessed 21.04.16).
- [15] M. Theraud, Accreditation certificate NF EN ISO 15189: 2012, (2015). <http://www.cofrac.fr/annexes/sect8/8-2607.pdf> (accessed 22.04.16).
- [16] J.R. Moody, R.M. Lindstrom, Selection and cleaning of plastic containers for storage of trace element samples, *Anal. Chem.* 49 (1977) 2264–2267.
- [17] D. Hodnett, D.M. Wood, K. Raja, P.I. Dargan, A.D. Shah, A healthy volunteer study to investigate trace element contamination of blood samples by stainless steel venepuncture needles, *Clin. Toxicol.* 50 (2012) 99–107.
- [18] A. Pinea, O. Guillard, P. Chappuis, J. Arnaud, R. Zawislak, Q. Lockitch, Sampling conditions for biological fluids for trace elements monitoring in hospital patients: a critical approach, *Crit. Rev. Clin. Lab. Sci.* 30 (1993) 203–222.
- [19] M. Hall, Y. Chen, H. Ahsan, V. Slavkovich, A. van Geen, F. Parvez, J. Graziano, Blood arsenic as a biomarker of arsenic exposure: results from a prospective study, *Toxicology* 225 (2006) 225–233.
- [20] E. Pruszkowski, Selenium Determination in Blood and Serum with ICP-MS. Field Application Report, PerkinElmer Life and Analytical, USA, 2004. http://www.perkinelmer.co.uk/files/pkia4629e394024_1.pdf.
- [21] K. Simitchiev, V. Stefanova, V. Kmetov, G. Andreev, A. Sanchez, A. Canals, Investigation of ICP-MS spectral interferences in the determination of Rh, Pt and Pd in road dust: assessment of correction algorithms via uncertainty budget analysis and interference alleviation by preliminary acid leaching, *Talanta* 77 (2008) 889–896.
- [22] J. Begerow, M. Turfeld, L. Dunemann, Determination of physiological palladium, platinum, iridium and gold levels in human blood using double focusing magnetic sector field inductively coupled plasma mass spectrometry, *J. Anal. At. Spectrom.* 12 (1997) 1095–1098.
- [23] L. Akomagni, Monographie de la commune de Cotonou, Afrique conseil, 2006. http://www.ancb-benin.org/pdc-sdac-monographies/monographies_communes/MonographieK20deK20Cotonou.pdf (accessed 22.04.16).
- [24] H. Röllin, A. Mathee, J. Levin, P. Theodorou, F. Wewers, Blood manganese concentrations among first-grade schoolchildren in two South African cities, *Environ. Res.* 97 (2005) 93–99.
- [25] S. Baiterman, F.-C. Su, C. Jia, R.N. Naidoo, T. Robins, I. Nkai, Manganese and lead in children's blood and airborne particulate matter in Durban South Africa, *Sci. Total Environ.* 409 (2011) 1058–1068.
- [26] G. Ngueta, R. Njajou, Blood lead concentrations in sub-Saharan African children below 6 years: systematic review, *Trop. Med. Int. Health* 18 (2013) 1283–1291.
- [27] R. Chittur, V.R. Baddam, L. Prasad, L. Prashanth, K. Kattapagari, A review on role of essential trace elements in health and disease, *J. De NTR Univ. Health Sci.* 4 (2015) 75.
- [28] M. Vinceti, C.M. Crespi, F. Bonvicini, C. Malagoli, M. Ferrante, S. Marmiroli, S. Stranges, The need for a reassessment of the safe upper limit of selenium in drinking water, *Sci. Total Environ.* 443 (2013) 633–642.
- [29] SONEB: Société Nationale des Eaux du Bénin, (n.d.). <http://www.soneb.com/soneb200-archives/2015-09/qualite-eau.php#partie2> (accessed 08.06.16).
- [30] T.E. Fox, E.G.H.M. Van den Heuvel, C.A. Atherton, J.R. Dainty, D.J. Lewis, N.J. Langford, H.M. Crews, J.B. Luten, M. Lorentzen, F.W. Sieling, P. van Aken-Schneyder, M. Hoek, M.J. Kotterman, P. van Dael, S.J. Fairweather-Tait, Bioavailability of selenium from fish, yeast and selenate: a comparative study in humans using stable isotopes, *Eur. J. Clin. Nutr.* 58 (2004) 343–349.
- [31] R.K. Srigboh, N. Basu, J. Stephens, E. Asampong, M. Perkins, R.L. Neitzel, J. Fobil, Multiple elemental exposures amongst workers at the Agbogbloshie electronic waste (e-waste) site in Ghana, *Chemosphere* 164 (2016) 68–74.
- [32] R. Sodjinou, V. Agueh, B. Fayomi, H. Delisle, Dietary patterns of urban adults in Benin: relationship with overall diet quality and socio-demographic characteristics, *Eur. J. Clin. Nutr.* 63 (2009) 222–228.
- [33] A.D.C. Chilimba, S.D. Young, C.R. Black, K.B. Rogerson, E.L. Ander, M.J. Watts, J. Lammel, M.R. Broadley, Maize grain and soil surveys reveal suboptimal dietary selenium intake is widespread in Malawi, *Sci. Rep.* 1 (2011).
- [34] M. G.D. Williams, N. Todd, J. Roney, C. Crawford, P.R. Coles, J.D. McClure, K. Carey, Zaccaria, M. Citra, Toxicological Profile for Manganese, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), Atlanta (GA), 2012 (accessed 14.04.16) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158872/>.
- [35] B. Bocca, R. Madeddu, Y. Asara, P. Tolu, J.A. Marchal, G. Forte, Assessment of reference ranges for blood Cu, Mn, Se and Zn in a selected Italian population, *J. Trace Elem. Med. Biol.* 25 (2011) 19–26.
- [36] C. Freire, R.J. Koifman, D. Fujimoto, V.C. de Oliveira Souza, F. Barbosa Jr., S. Koifman, Reference values of cadmium, arsenic and manganese in blood and factors associated with exposure levels among adult population of Rio Branco Acre, Brazil, *Chemosphere* 128 (2015) 70–78.
- [37] J. Tuakula, M. Kabamba, H. Mata, G. Mata, Toxic and essential elements in children's blood (<6 years) from Kinshasa, DRC (the democratic republic of Congo), *J. Trace Elem. Med. Biol.* 28 (2014) 45–49.
- [38] S. Kolawole, H. Obueh, Relationship between soil contents and plasma levels of selenium chromium and manganese in healthy adult Nigerians, *Afr. J. Biotechnol.* (2013) 5330–5346.
- [39] B.F. Cachon, S. Firmin, A. Verdin, L. Ayi-Fanou, S. Bilet, F. Cazier, P.J. Martin, F. Aissi, D. Courcot, A. Sanni, P. Shirali, Proinflammatory effects and oxidative stress within human bronchial epithelial cells exposed to atmospheric particulate matter (PM_{2.5} and PM_{10-2.5}) collected from Cotonou Benin, *Environ. Pollut. Barking Essex* 185 (2014) (1987) 340–351.
- [40] L. Ayi Fanou, T.A. Mobin, E.E. Creppy, B. Fayomi, S. Fustoni, P. Møller, S. Kyrtopoulos, P. Georgiades, S. Loft, A. Sanni, H. Skov, S. Ourebe, H. Austrup, Survey of air pollution in Cotonou, Benin—air monitoring and biomarkers, *Sci. Total Environ.* 358 (2006) 85–96.
- [41] M. Baldwin, D. Mergier, F. Lambe, S. Béanger, R. Tardif, L. Bilodeau, K. Hudnell, Bioindicator and exposure data for a population based study of manganese, *Neurotoxicology* 20 (1999) 343–353.
- [42] B. Michalke, S. Halbach, V. Nischwitz, Speciation and toxicological relevance of manganese in humans, *J. Environ. Monit.* JEM 9 (2007) 650–656.
- [43] K.R. Wessels, K.H. Brown, Estimating the global prevalence of zinc deficiency: results based on zinc availability in national food supplies and the prevalence of stunting, *PLoS One* 7 (2012) e50568.
- [44] V. Galetti, C.E.S. Mitchipke, P. Kujinga, F. Tossou, D.J. Hounhouigan, M.B. Zimmermann, D. Moretti, Rural beninese children are at risk of zinc deficiency according to stunting prevalence and plasma zinc concentration but not dietary zinc intakes, *J. Nutr.* 146 (2016) 114–123.
- [45] J.R. Turnlund, L.T. Friberg, Chapter 34, Molybdenum, in: *Handb. Toxicol. Met.*, 3e ed., Amsterdam, 2007, pp. 731–741.

Please cite this article in press as: B. Yedomon, et al., Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS, *J. Trace Elem. Med. Biol.* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>



- [46] L. Koumofou, P. Edoeh, S. Montcho, K. Aklakokou, F. Loko, M. Boko, E.E. Creppy, Health-risk market garden production linked to heavy metals in irrigation water in Benin, *C. R. Biol.* 336 (2013) 278–283.
- [47] V. Dougnon, P. Edoeh, H. Bankiô, J. Dougnon, J.R. Klotô, F. Loko, E.E. Creppy, M. Boko, Presence of lead in leaves of *Solanum macrocarpon* cultivated in Cotonou (Benin): role of poorly composted poultry manure, *C. R. Biol.* 336 (2013) 261–264.
- [48] J.D. Nriagu, Toxic metal pollution in Africa, *Sci. Total Environ.* 121 (1992) 1–37.
- [49] R. Khelif, P. Olmedo, F. Gil, M. Feki-Toussi, B. Hammami, A. Rebai, A. Hamza-Chaffai, Biomonitoring of cadmium chromium, nickel and arsenic in general population living near mining and active industrial areas in Southern Tunisia, *Environ. Monit. Assess.* 186 (2013) 761–770.
- [50] L. Fourn, E.B. Fayomi, Air pollution in urban area in Cotonou and Lokossa, Benin, *Bull. Soc. Pathol. Exot.* 99 (2006) 264–268.
- [51] K.E. Agbossou, M.S. Sanny, B. Zokpoto, B. Ahamide, H.J. Cuedegbe, Evaluation qualitative de quelques légumes sur le périmètre maraîcher de Houéyitho, à Cotonou au sud-Bénin, *Bull. Rech. Agron. Bénin* 42 (2003) 1–12.
- [52] W. Hammel, R. Debus, L. Steubing, Mobility of antimony in soil and its availability to plants, *Chemosphere* 41 (2000) 1793–1798.
- [53] ATSDR, Toxicological Profile for strontium, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2001. <http://www.atsdr.cdc.gov/gate2/inist/t/toxprofiles/tp159.pdf> (accessed 21.10.16).
- [54] M. Janicka, L.J. Binkowski, M. Blaszczyk, J. Paluch, W. Wojtaś, P. Massanyi, R. Stawarz, Cadmium, lead and mercury concentrations and their influence on morphological parameters in blood donors from different age groups from southern Poland, *J. Trace Elem. Med. Biol.* 29 (2015) 342–346.
- [55] R.F. Herber, J.M. Christensen, E. Sabbioni, Critical evaluation and review of cadmium concentrations in blood for use in occupational health according to the TRACY protocol, *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 69 (1997) 373–378.
- [56] K. Becker, S. Kaus, C. Krause, P. Leporn, C. Schulz, M. Seiwert, B. Seifert, German environmental survey 1998 (GerES III): environmental pollutants in blood of the german population, *Int. J. Hyg. Environ. Health* 205 (2002) 297–308.
- [57] A. Cesbron, E. Saussezeau, L. Mahieu, L. Couland, M. Guerbet, J.-P. Goullé, Metallic profile of whole blood and plasma in a series of 106 healthy volunteers, *J. Anal. Toxicol.* 37 (2013) 401–405.
- [58] ATSDR, Toxicological Profile for Beryllium, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2002. <http://www.atsdr.cdc.gov/gate2/inist/t/toxprofiles/tp4.pdf> (accessed 21.10.16).
- [59] Canada Health Canada, Second report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada: results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 2 (2009–2011), 2013. <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3288862> (accessed 24.04.16).

Please cite this article in press as: B. Yedomon, et al., Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS, *J Trace Elem Med Biol* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.004>



II.4.1. Résumé des résultats et discussion de l'article 2

- Résultats principaux :

Les valeurs de références (VR) sont proposées pour les 29 éléments traces métalliques (voir tableau 14). Pour 6 éléments : V (vanadium), Cr (chrome), Ce (cérium), W (tungstène), Pt (platine), et Bi (bismuth), les niveaux de base en population générale étaient très bas (63 à 89% des échantillons avaient des valeurs inférieures à la limite de quantification). Les valeurs de référence (VR) proposées pour ces 6 éléments sont alors données à titre indicatif comme en dessous de la limite de quantification. Pour 7 autres éléments (Li (lithium), Be (béryllium), Al (aluminium), Pd (palladium), Sn (étain), Ba (baryum), U (uranium)) nous avons entre 4% et 36% des échantillons analysés qui avaient des valeurs inférieures à la limite de quantification.

Tableau 16 : Valeurs de références (95^{ème} Percentile) pour les éléments essentiels et les éléments toxiques en population Béninoise :

Éléments	VR95 Bénin en µg/L	Éléments	VR95 Bénin en µg/L
⁷ Li	0,85	⁹⁸ Mo	3,16
⁹ Be	0,196	¹⁰³ Rh	0,053
²⁵ Mg	34059	¹⁰⁵ Pd	3,79
Al	10,04	¹¹¹ Cd	0,63
⁵¹ V	< 0,1	¹¹⁸ Sn	0,48
⁵² Cr	< 0,24	¹²¹ Sb	8,94
⁵⁶ Fe	553716	¹³⁸ Ba	0,99
⁵⁵ Mn	25,14	¹⁴⁰ Ce	<0,010
⁵⁹ Co	1,30	¹⁸⁴ W	<0,002
⁶³ Cu	1027	¹⁹⁵ Pt	<0,001
⁶⁴ Zn	6668	²⁰² Hg	7,64
⁷⁵ As	10,55	²⁰⁵ Tl	0,27
⁸² Se	205	²⁰⁸ Pb	74,78
⁸⁸ Sr	48,42	²⁰⁹ Bi	< 0,010
		²³⁸ U	0,008

- Discussion

Cotonou est situé sur le cordon littoral entre le Lac Nokoué et l'Océan Atlantique et traversé par un canal, la lagune de Cotonou. Cette situation de ville côtière, et capitale économique est un contexte particulier dans le cadre d'une étude sur les éléments traces métalliques. La discussion de cette première étude est faite en deux parties, les éléments essentiels et les éléments toxiques.

Éléments essentiels :

Pour le sélénium, le cuivre et le zinc, les résultats trouvés en population générale au Bénin sont compris dans les valeurs de référence de la littérature, bien que ces valeurs soient plus proches du 95^{ème} percentile des autres études (voir tableau 4 de l'article 1). A contrario, les valeurs du cuivre et du zinc sont plus proches du 5^{ème} percentile d'autres études (voir tableau 4 de l'article 1).

Eléments toxiques :

La pollution par les métaux toxiques au Bénin est un problème environnemental et de nombreux auteurs se sont intéressés aux différentes sources de la pollution anthropique. La pollution atmosphérique, la pollution des eaux (eau de boisson, eau d'arrosage, eau de mer) et des sols peuvent atteindre des niveaux suffisants pour contaminer les espèces animales ou végétales consommées par les populations (poissons et légumes (Olade, 1987; Dougnon et al., 2013; Koumolou et al., 2013).

Dans notre étude, les concentrations sanguines moyennes de l'arsenic, du mercure, du plomb, du strontium et de l'antimoine étaient dans les fourchettes normales, mais tendent vers les limites supérieures (95^{ème} percentile) retrouvées dans la littérature (voir tableau 5 de l'article 1).

Cette étude servira de référence pour identifier des groupes spécifiques à risque en ce qui concerne l'exposition professionnelle. Grace à cette étude à Cotonou, il est désormais possible de détecter une exposition professionnelle en comparant certaines concentrations d'éléments toxiques avec les VR du 95^{ème} percentile de la présente étude. En outre, parmi les oligo-éléments essentiels présentés dans cette étude (mal connus pour certains d'entre eux), il sera également possible d'identifier des carences (lorsque les valeurs trouvées sont inférieures aux valeurs du 5^{ème} percentile).

II.5. Article N° 3 : Évaluation de 20 métaux toxiques et essentiels dans le sang des ferblantiers informels, recycleurs de métaux à Cotonou (Bénin)

Pour soumission à "International Journal of Hygiene and Environmental Health". IF (2015) : 3,98.

Évaluation de 20 métaux toxiques et éléments essentiels dans le sang des ferblantiers informels, recycleurs de métaux à Cotonou (Bénin)

Auteurs : Brice Yedomon, Alain Menudier, Katia Dugleux, Benjamin Fayomi, Michel Druet-Cabanac, Christian Moesch

Résumé : L'absence d'utilisation d'équipements de protection chez les apprentis et artisans de l'économie informelle est fréquente. Chez les ferblantiers, l'exposition à des émanations toxiques notamment des fumées de métaux en fusion pouvant contenir des particules métalliques est susceptible d'entraîner une imprégnation en métaux toxiques.

Objectifs : Cette étude avait pour objectif principal d'évaluer les concentrations biologiques de métaux toxiques et éléments traces essentiels chez des ferblantiers, artisans et apprentis, travaillant dans le secteur informel à Cotonou, au Bénin. **Matériels et méthodes :** 20 éléments traces métalliques ont été mesurés dans le sang total chez 111 artisans ferblantiers adultes de sexe masculin et uniquement la plombémie chez 24 apprentis de moins de 18 ans. Les prélèvements sanguins ont été réalisés au centre de santé ERASME à Cotonou, au moyen de tubes EDTA-K2 éléments traces de 6 ml. Les analyses ont été réalisées par ICP-MS (Inductive Coupled Plasma-Mass Spectrometry) sur un appareil NexION 350 D (PerkinElmer). Les résultats obtenus ont été ensuite comparés à ceux obtenus dans une population de référence de Cotonou, non exposée professionnellement.

Résultats : Pour 3 éléments traces, plus de 25 % des ferblantiers adultes présentaient des concentrations sanguines supérieures aux valeurs biologiques de référence. Par ordre croissant de niveau d'imprégnation, il s'agissait de l'antimoine (28,8 %), de l'étain (31,5 %) et du plomb (71,2 %). Chez les moins de 18 ans, la prévalence des travailleurs ayant une plombémie $\geq 100 \mu\text{g/L}$ était de 83 %.

Conclusion : L'exposition au plomb était la plus préoccupante et des mesures de protection et de sensibilisation doivent être proposées afin de diminuer les risques sanitaires liés à l'exposition au plomb, notamment chez les jeunes travailleurs.

Keywords: Biomonitoring, occupational health, trace elements, tinsmiths, informal economy lead

Mots-clés : Surveillance biologique, santé au travail, éléments traces, ferblantiers, économie informelle, plombémie

1. Introduction

L'artisanat de récupération et de recyclage est une activité dont la matière première est constituée de matériels usagés. Ces matériels sont des déchets non biodégradables, des résidus de métaux, des boîtes de conserves vides, des ferrailles de tout genre. L'artisanat de récupération et de recyclage des déchets métalliques joue un rôle écologique important, en réduisant le volume des déchets solides dans l'environnement (Martchek, 2000). Dans certains cas, cette activité de collecte des métaux se mène parallèlement à celle de recyclage des déchets électroniques en étant assimilée à cette dernière. Toutefois le recyclage des déchets métalliques est une activité à part entière, qui présente un large éventail de risques, et les intoxications les plus couramment rencontrées seraient liées au plomb, au cadmium et au nickel (Occupational Safety and Health Administration, 2008).

Au Bénin, l'essentiel des unités artisanales sont concentrées dans le département du Littoral et la commune de Cotonou abrite à elle seule environ 30 % des unités artisanales (INSAE, 2010). Parmi les travailleurs informels impliqués dans le recyclage des déchets métalliques, on retrouve des artisans récupérateurs (fondeurs, ferblantiers, forgerons) ou leurs apprentis qui utilisent des métaux ferreux ou non ferreux comme matières premières dans les ateliers de production. La précarité des conditions de travail et l'absence d'équipements de protection est d'autant plus alarmante que ces artisans sont exposés dès le plus jeune âge à des émanations toxiques (Ayelo et al., 2010 ; Tossou, 2001). Les plus jeunes, sont plus vulnérables à l'exposition aux métaux toxiques (Nordberg et al., 2007), cependant aucune investigation n'a permis au Bénin de caractériser ces expositions en déterminant par exemple le niveau biologique d'imprégnation aux métaux toxiques. L'existence de valeurs de référence pour certains toxiques et la surveillance biologique de l'exposition constituent un progrès dans la démarche préventive des situations d'exposition professionnelle ou environnementale (Schulz et al., 2009 ; Angerer et al., 2011). Des études sur les concentrations biologiques des éléments traces métalliques en population Africaine sub-saharienne exposée, soit par le biais de l'environnement ou de par le fait de leurs activités professionnelles restent encore récentes et généralement menées par spectrophotométrie d'absorption atomique (Röllin et al., 2005 ; Ademoroti et Oviawe, 2006). Quelques rares travaux ont été menés par ICP-MS (Inductive Coupled Plasma-Mass Spectrometry), technique reconnue pour sa sensibilité et sa capacité multi élémentaire (Tuakuila et al., 2014 ; Bodeau-Livinec et al., 2016 ; Srigboh et al., 2016). Au Bénin, des valeurs de référence en population générale de 29 éléments traces métalliques ont été déterminées par ICP-MS (Yedomon et al., 2016). Il apparaît essentiel de comparer les valeurs retrouvées dans des groupes professionnels potentiellement exposés, aux valeurs de référence 95^{ème} percentile (VR95) retrouvées en population non exposée professionnellement à Cotonou. Cette étude vise à évaluer le niveau d'imprégnation pour 20 éléments traces

métalliques (métaux toxiques et essentiels) dans le sang des artisans ferblantiers adultes et uniquement les plombémies chez les apprentis ferblantiers de moins de 18 ans.

2. Matériels et méthodes

L'étude s'est déroulée de décembre 2015 à janvier 2016 à Midombô, dans le 3^{ème} arrondissement de Cotonou. Cette étude a reçu l'approbation préalable du Comité d'Ethique de la Recherche de l'Institut des Sciences Biomédicales Appliquées du Bénin (avis favorable n°74 du 15/09/2015).

2.1. Population étudiée

La population étudiée a été constituée par échantillonnage exhaustif avec comme participants volontaires, 135 ferblantiers issus des 251 artisans travaillant sur le site de Midombô. Tous les ferblantiers étaient de sexe masculin et ont librement consenti à participer à l'étude. Pour les personnes de moins de 18 ans, le consentement éclairé a été donné par le tuteur légal. La population a été répartie en deux catégories dont les plus de 18 ans au nombre de 111 et les moins de 18 ans au nombre de 24.

2.2. Prélèvements

Des précautions ont été prises pour éviter la contamination lors du prélèvement et de la manipulation des échantillons jusqu'à l'analyse. Les prélèvements ont été réalisés dans un centre médical en dehors du site de travail (centre de santé ERASME) après un nettoyage rigoureux à l'alcool (70°) de la zone de prélèvement au pli du coude. Des tubes EDTA-K2 (dipotassium ethylenediaminetetraacetic acid) éléments traces de 6 ml (Vacutainer® Becton Dickinson, Le Pont du Clay, France) et des aiguilles siliconées (BD Vacutainer®) adaptés à un système sous vide pour le prélèvement du sang veineux ont été utilisés. Les échantillons prélevés ont été conservés au froid (-20°C) et acheminés par avion, au Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Limoges (France) en respectant la chaîne du froid (carboglace). Les analyses ont été réalisées dans une salle blanche de classe ISO 6, au Département de Pharmacologie-Toxicologie du CHU de Limoges.

2.3. Analyse élémentaire

Après décongélation et homogénéisation (par retournements successifs et au vortex) des échantillons sanguins, les analyses ont été réalisées par ICP-MS sur un appareil NexION 350 D (PerkinElmer) (Perkin-Elmer, Courtaboeuf, France) selon la méthode instrumentale décrite précédemment dans l'étude menée en population générale, chez des donneurs de sang à Cotonou (Yedomon et al., 2016). Les éléments analysés dans le sang total étaient au nombre de 10 pour les éléments chimiques toxiques et au nombre de 10 pour les éléments chimiques essentiels. Les éléments chimiques toxiques pris en considération dans cette étude étaient le

plomb (^{208}Pb), l'arsenic (^{75}As), l'antimoine (^{121}Sb), le strontium (^{88}Sr), le mercure (^{202}Hg), le cadmium (^{111}Cd), le béryllium (^9Be), le baryum (^{138}Ba), l'étain (^{118}Sn) et le bismuth (^{209}Bi). Les éléments traces essentiels recherchés étaient le magnésium (^{25}Mg), le chrome (^{52}Cr), le sélénium (^{82}Se), le manganèse (^{55}Mn), le zinc (^{64}Zn), le molybdène (^{98}Mo), le cobalt (^{59}Co), le cuivre (^{63}Cu), le fer (^{56}Fe) et le vanadium (^{51}V).

2.4. Assurance qualité

Le laboratoire d'analyse du Département de pharmacologie-toxicologie du CHU de Limoges est accrédité COFRAC ISO 15189, garantissant la compétence technique et l'existence d'un système de gestion de qualité approprié. Pour s'assurer de la reproductibilité et de la précision des mesures tout au long des analyses, un contrôle qualité interne Seronorm™ L-2 est inséré dans chaque série, tous les 5 échantillons. Par ailleurs, pour chacun des 20 éléments de cette étude, excepté le fer et le magnésium, le laboratoire a participé au contrôle de qualité externe multiélémentaire QMEQAS (Programme de comparaison de l'Institut national de la santé publique du Québec). Pour chaque résultat soumis au programme QMEQAS, un z-score a été calculé pour évaluer la précision analytique à partir des résultats non arrondis.

2.4. Analyse statistique

Les variables dépendantes sont les concentrations en $\mu\text{g/L}$ de 20 éléments traces et métaux toxiques. Pour tous les éléments, la moyenne arithmétique, la déviation standard, la médiane, l'étendue (minimum et maximum) ont été déterminées.

Pour chaque élément, le pourcentage de ferblantiers adultes présentant des concentrations en éléments traces, au-dessus des valeurs (VR95) de la population de référence de Cotonou, a été déterminé.

Les variables indépendantes sont les données issues du questionnaire socio professionnel et médical renseigné par les ferblantiers. Il s'agissait de l'âge, du niveau scolaire, de l'ancienneté dans l'atelier, de la réalisation d'activités exposant directement aux fumées, de la tension artérielle et de l'indice de masse corporel (IMC). Les résultats de la plombémie ont été analysés en fonction de ces différentes variables indépendantes. Seulement 4 ferblantiers ont mentionné qu'ils fumaient de façon irrégulière. Aucune analyse statistique spécifique n'a été effectuée pour ce groupe (moins de 3 % de la population d'étude).

Les données ont été analysées avec le logiciel SPSS.20 (SPSS Statistics for Windows, Version 20.0. Armonk, NY: IBM Corp). Les comparaisons des variables quantitatives ont été réalisées par des tests U de Mann-Whitney. Le seuil de significativité choisi pour l'ensemble des analyses statistiques était de 5 %.

3. Résultats

Les caractéristiques socio-professionnelles et médicales des ferblantiers sont résumées au tableau 1.

3.1. Assurance qualité pour l'analyse élémentaire

Les résultats des contrôles de qualité externe QMEQAS sont présentés pour les 20 éléments analysés (tableau 2). Les valeurs de Z score au sein de la plage de -2 à +2 étaient considérées comme satisfaisantes pour tous les éléments, excepté pour le manganèse qui était légèrement élevé. Les résultats des contrôles de qualité internes Seronorm™ ont montré une sensibilité, une robustesse et une reproductibilité de notre méthode, avec des coefficients de variation satisfaisants ($CV \leq 10\%$) pour tous les éléments, y compris pour le manganèse (tableau 3).

3.2. Concentrations sanguines des éléments traces métalliques

Les résultats des concentrations sanguines en ETM sont présentés dans le tableau 4 et concernent uniquement les ferblantiers de plus de 18 ans (N=111). Dans ces 111 échantillons sanguins, les 6 ETM suivants étaient non détectables dans les proportions marquées entre parenthèses : ^9Be (41,44 %), ^{51}V (62,16 %), ^{52}Cr (65,76 %), ^{118}Sn (6,31 %), ^{138}Ba (22,52 %), ^{209}Bi (74,77 %).

3.3. Plombémie et variables indépendantes

Les résultats de la plombémie chez l'ensemble des 135 participants en fonction des variables indépendantes issues du questionnaire socio professionnel et médical sont les suivantes :

- *Plombémie en fonction de l'âge et de l'ancienneté dans l'atelier*

Chez les moins de 18 ans (N=24), la plombémie moyenne était de $152,0 \pm 52,1$ µg/L avec une étendue comprise entre 63,6 et 252,8 µg/L. Chez les ferblantiers de plus de 18 ans, la moyenne de la plombémie était plus faible que chez les moins de 18 ans (voir figure 1). La plombémie était supérieure à 100 µg/L pour 83,3 % de ces jeunes travailleurs. On notait une augmentation du plomb sanguin avec l'ancienneté dans les ateliers uniquement chez les moins de 18 ans ($r=0,47$; $p=0,019$).

- *Plombémie en fonction du niveau scolaire*

La plombémie moyenne était plus faible (de façon non significative) chez les artisans ayant été scolarisés avec un niveau secondaire ($82,8 \pm 30,1$ µg/L) par rapport aux artisans non scolarisés ($105,9 \pm 43,9$ µg/L avec $p=0,11$) ou ayant été uniquement scolarisé en cours primaire ($119,8 \pm 55,5$ µg/L avec $p=0,137$).

- *Plombémie en fonction de l'exposition aux fumées*

La plombémie moyenne était significativement plus élevée ($p < 0,0001$) chez les personnes exposées directement aux fumées ($142,6 \pm 62,5 \mu\text{g/L}$) versus ($93,5 \pm 29,6 \mu\text{g/L}$) chez les personnes ayant déclaré ne pas être directement exposées.

- *Plombémie en fonction de la tension artérielle*

La plombémie moyenne était légèrement plus élevée ($p = 0,10$) chez les personnes normotendues ($115,6 \pm 53,5 \mu\text{g/L}$) mais sans différence significative avec les personnes hypertendues ($101,9 \pm 41,3 \mu\text{g/L}$).

- *Plombémie en fonction de l'indice de masse corporelle*

La plombémie moyenne était significativement plus faible ($p = 0,01$) chez les artisans en surpoids que chez ceux ayant un IMC normal ($92,3 \pm 37,9 \mu\text{g/L}$ contre $120,0 \pm 53,3 \mu\text{g/L}$).

4. Discussion

- *Points forts de l'étude*

Cette étude a permis de déterminer les concentrations sanguines pour 20 éléments traces métalliques chez des ferblantiers adultes, tout en disposant de valeurs de référence en population générale à Cotonou. La comparabilité des résultats entre la population de référence à Cotonou et la population des artisans est améliorée par le fait que les conditions instrumentales et opératoires des deux études étaient identiques. De plus, ces analyses répondent aux exigences de qualité de l'accréditation COFRAC.

- *Difficultés liées à l'étude*

L'analyse d'une vingtaine d'éléments chez des populations exposées présente une difficulté majeure qui est celle de l'interprétation des résultats (Guidotti, 1988). Les valeurs limites de référence, au-dessus desquelles un ou plusieurs effets indésirables peuvent survenir sont parfois mal connues. Au cours de cette étude, nous avons comparé nos résultats aux valeurs de références déterminées à Cotonou (Yedomon et al., 2016) ainsi qu'à ceux d'études récemment effectuées au Ghana chez les recycleurs de déchets électroniques ((Srigboh et al., 2016 ; Kyere et al., 2016). Notre discussion s'est ensuite focalisée principalement sur les concentrations sanguines du plomb, du mercure, du manganèse et du cadmium pour lesquelles des organismes internationaux proposent des valeurs limites biologiques.

- *Comparaison des résultats des ferblantiers avec la population Béninoise de référence*

Selon le tableau 6, pour 3 éléments traces, au moins 25 % des ferblantiers présentaient des concentrations sanguines supérieures aux VR95 de la population de référence. Pour ces 3

éléments (Pb, Sb, Sn), l'illustration de la distribution des valeurs et leur comparaison avec la population générale de Cotonou est présentée figure 2.

- *Comparaison des résultats des ferblantiers avec les recycleurs de déchets électroniques au Ghana* (Srigboh et al., 2016)

Contrairement au cadmium sanguin, les concentrations du plomb et du mercure dans notre étude sont supérieures aux concentrations retrouvées chez les recycleurs de déchets électroniques au Ghana (tableau 5). Ce constat pourrait s'expliquer par le fait que les niveaux de base pour ces éléments en population générale à Cotonou étaient déjà relativement élevés du fait de l'environnement (tableau 6). Sur le site de recyclage de déchets d'Agbogbloshie au Ghana, le cadmium était l'un des polluants les plus importants du sol, d'où une imprégnation supérieure observée chez ces recycleurs de métaux (Kyeré et al., 2016). De plus, le fait que les ferblantiers soient très peu exposés aux fumées de cigarettes (moins de 3 %), peut expliquer que les concentrations sanguines de cadmium (moyenne = 0,26 µg/L) sont relativement similaires à celles de la population de référence non exposée (Yedomon et al., 2016).

- *Comparaison des résultats des ferblantiers avec les valeurs de référence biologiques reconnues par les hygiénistes du travail pour le mercure, le plomb, le manganèse et le cadmium*

→ **Mercure sanguin**

Sur les 111 ferblantiers de 18 ans et plus, 87,39 % avaient des concentrations sanguines de mercure inférieures à 5 µg/L. Cette valeur représente la HBM-I (Human Biomonitoring I) ou concentration biologique fixée par les hygiénistes allemands, en dessous de laquelle, à priori, aucun effet indésirable ne saurait être détecté (Angerer et al. 2011). La HBM-II désigne la concentration biologique, au-dessus de laquelle des effets indésirables sur la santé se produisent. Cette valeur HBM-II est de 15 µg/L pour le mercure sanguin et est également la limite fixée en fin de poste, fin de semaine de travail, par l'ACGIH ou American Conference of Governmental Industrial Hygienists) (ACGIH, 2012) (Angerer et al., 2011). Pour 11,71 % des ferblantiers adultes, les concentrations sanguines sont comprises entre 5 et 15 µg/L, valeurs pour lesquelles des effets indésirables seraient envisageables. Parmi les ferblantiers, 1 artisan présentait un taux de mercure sanguin à 34 µg/L soit le double de la valeur HBM II. Agé de 26 ans avec une ancienneté de 15 ans dans l'atelier, il travaillait 10 heures/jour, 6 jours par semaine et a déclaré être exposé régulièrement à des fumées au cours de son activité.

→ **Plombémie**

Le plomb est utilisé dans la fabrication de pièces diverses en association avec l'antimoine ou l'étain sous forme d'alliages, afin d'abaisser le point de fusion, d'augmenter les propriétés

mécaniques ou d'améliorer les caractéristiques électrochimiques. Ainsi, lorsque le plomb ou ses alliages sont fondus, il y a émission d'une quantité importante de fines poussières d'oxyde de plomb qui peuvent être à l'origine d'une imprégnation en milieu professionnel (Lauwerys, 2007). Le plomb et ses composés inorganiques ont été classés par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) dans le groupe 2A (probablement cancérigène pour l'homme) et par la Deutsche Forschungsgemeinschaft - MAK Commission (DFG) dans la catégorie 2 (cancérogène humain), raison pour laquelle la DFG a suspendu les valeurs HBM pour la plombémie des enfants et des adultes (Wilhelm et al., 2010).

Selon l'ACGIH, la valeur biologique du plomb sanguin indiquant une exposition et en dessous de laquelle presque tous les travailleurs ne devraient pas subir d'effets néfastes sur la santé est de 300 µg/L. Chez les ferblantiers adultes, 1 artisan avait une plombémie à 304,1 µg/L, soit supérieure à la concentration seuil ou BEI (Biological Exposure Index) des hygiénistes Américains. Il s'agissait d'un travailleur de 23 ans avec 10 ans d'ancienneté, 10 heures de travail quotidien et ayant déclaré être régulièrement exposé à des fumées ou poussières au travail.

Pour les enfants mineurs (N=24) ayant participé à notre étude 83,3 % présentaient une plombémie supérieure à 100 µg/L, concentration dont on sait qu'elle peut entraîner une altération du développement neurologique chez l'enfant (CDC, 2012). La consommation d'aliments directement dans les ateliers pourrait augmenter le risque d'intoxication au plomb, notamment chez les jeunes apprentis car le taux d'absorption gastro-intestinale du plomb est de 4 à 5 fois plus élevé chez l'enfant que chez l'adulte.

Ces résultats montrent qu'il y a une exposition professionnelle chez les ferblantiers et que les sujets de moins de 18 ans seraient les plus exposés.

→ **Manganèse sanguin**

Selon les limites de la DFG, la valeur de référence BAR (Biologische Arbeitsstoff-Referenzwerte) est fixée à 15 µg/L. La valeur BAR permet de décrire les niveaux biologiques usuels de xénobiotiques présents à un moment donné, dans une population générale, chez des personnes en âge de travailler non professionnellement exposées. La moyenne du manganèse sanguin dans notre étude ($13 \pm 3,8$ µg/L), indique que l'exposition au manganèse chez les ferblantiers semble négligeable.

→ **Cadmium sanguin**

La concentration moyenne du cadmium sanguin chez les ferblantiers ($0,26 \pm 0,16$ µg/L) est largement inférieure à 5 µg/L qui est l'indice biologique d'exposition proposé par les hygiénistes Américains de l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012).

5. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la plombémie chez les ferblantiers est particulièrement élevée par rapport à celle de la population générale et surtout chez les jeunes de moins de 18 ans. L'évaluation des conditions de travail et la description des postes les plus à risques devraient permettre de sensibiliser les artisans et d'éviter que les enfants n'effectuent certaines activités à risque.

Références

- Ademoroti C.M.A, Oviawe A.P., 2006. Blood Lead Levels of People Living in Traffic Areas in Benin City, Nigeria. *J. Appl. Sci.* 6, 2014–2019.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012. 2012 TLVs and BEIs: based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices. ACGIH Signature Publications, Cincinnati, Ohio.
- Angerer, J., Aylward, L.L., Hays, S.M., Heinzow, B., Wilhelm, M., 2011. Human biomonitoring assessment values: Approaches and data requirements. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 214, 348–360.
- Ayelo, P., Baloïtcha, P., Fayomi, B., 2010. Situation socio sanitaire des apprentis en milieu artisanal à Cotonou Socio health situation of artisan apprentices in Cotonou. *J Int Santé Trav* 2, 31–39.
- Bodeau-Livinec, F., Glorennec, P., Cot, M., Dumas, P., Durand, S., Massougbojji, A., Ayotte, P., Le Bot, B., 2016. Elevated Blood Lead Levels in Infants and Mothers in Benin and Potential Sources of Exposure. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 13.
- Canoui-Poitrine, F., Lecoffre, C., Garnier, R., Pulce, C., Sabouraud, S., Mathieu-Nolf, M., Cezard, C., Harry, P., Lagarce, L., Poisot, D., others, 2007. Dépistage du saturnisme infantile en France entre 1995 et 2002. *Environ. Risques Santé* 6, 425–432.
- Centers for Disease Control and Prevention, 2012. Recommendations in “Low Level Lead Exposure Harms Children: A Renewed Call of Primary Prevention.”
- Guidotti, T.L., 1988. Exposure to hazard and individual risk: when occupational medicine gets personal. *J. Occup. Med. Off. Publ. Ind. Med. Assoc.* 30, 570–577.
- INSAE, 2010. Rapport_Artisanat_RGE2, Les entreprises artisanales au Bénin [WWW Document]. URL <http://www.insae-bj.org/recensement-entreprises.html?file=files/enquetes.../rge/...RGE2.pdf> (accessed 8.10.16).
- Kyere, V.N., Greve, K., Atiemo, S.M., 2016. Spatial assessment of soil contamination by heavy metals from informal electronic waste recycling in Agbogbloshie, Ghana. *Environ. Health Toxicol.* 31, 1-10.
- Lanphear, B.P., Dietrich, K., Auinger, P., Cox, C., 2000. Cognitive deficits associated with blood lead concentrations <10 microg/dL in US children and adolescents. *Public Health Rep. Wash. DC* 1974 115, 521–529.
- Lauwerys, R.R., 2007. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles. Elsevier Masson, Paris.
- Martchek, K.J., 2000. The importance of recycling to the environmental profile of metal products.

Nordberg, G., Fowler, B., Nordberg, M., Friberg, L., 2007. Handbook on the toxicology of metals, 3rd ed. ed. Elsevier.

Occupational Safety and Health Administration, 2008. Guidance for the Identification and Control of Safety and Health Hazards in Metal Scrap Recycling. U.S. Department of Labor.

Röllin, H., Mathee, A., Levin, J., Theodorou, P., Wewers, F., 2005. Blood manganese concentrations among first-grade schoolchildren in two South African cities. *Environ. Res.* 97, 93–99.

Schulz, C., Angerer, J., Ewers, U., Heudorf, U., Wilhelm, M., 2009. Revised and new reference values for environmental pollutants in urine or blood of children in Germany derived from the German Environmental Survey on Children 2003-2006 (GerES IV). *Int. J. Hyg. Environ. Health* 212, 637–647.

Srigboh, R.K., Basu, N., Stephens, J., Asampong, E., Perkins, M., Neitzel, R.L., Fobil, J., 2016. Multiple elemental exposures amongst workers at the Agbogbloshie electronic waste (e-waste) site in Ghana. *Chemosphere* 164, 68–74.

Tossou, F., 2001. Évaluation des conditions de travail et de l'état de santé des enfants dans le secteur informel au Bénin : cas des apprentis ferblantiers de Cotonou 62 (5), 385-387.

Tuakuila, J., Kabamba, M., Mata, H., Mata, G., 2014. Toxic and essential elements in children's blood (<6 years) from Kinshasa, DRC (the Democratic Republic of Congo). *J. Trace Elem. Med. Biol. Organ Soc. Miner. Trace Elem. GMS* 28, 45–49.

Tuakuila, J., Lison, D., Lantin, A.-C., Mbuyi, F., Deumer, G., Haufroid, V., Hoet, P., 2012. Worrying exposure to trace elements in the population of Kinshasa, Democratic Republic of Congo (DRC). *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 85, 927–939.

Tuakuila, J., Lison, D., Mbuyi, F., Haufroid, V., Hoet, P., 2013. Elevated blood lead levels and sources of exposure in the population of Kinshasa, the capital of the Democratic Republic of Congo. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 23, 81–87.

Wilhelm, M., Heinzow, B., Angerer, J., Schulz, C., 2010. Reassessment of critical lead effects by the German Human Biomonitoring Commission results in suspension of the human biomonitoring values (HBM I and HBM II) for lead in blood of children and adults. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 213, 265–269.

Yedomon, B., Menudier, A., Etangs, F.L.D., Anani, L., Fayomi, B., Druet-Cabanac, M., Moesch, C., 2016. Biomonitoring of 29 trace elements in whole blood from inhabitants of Cotonou (Benin) by ICP-MS. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 9. pii: S0946-672X(16)30235-8.

Conflits d'intérêts

Il n'existe aucun conflit d'intérêt par rapport à cette étude

Remerciements

Nous voulons remercier les responsables d'ateliers, qui nous ont permis de mobiliser le maximum d'artisans pour la réalisation de cette étude.

Tableau 1 : Caractéristiques socio-professionnelles et médicales des ferblantiers

Variable	N	Pourcentage
Groupes d'âges (années)		
9-18	24	17,8
18-65	111	82,2
Ancienneté dans l'atelier (années)		
5 ≤	27	20,0
] 5-10]	33	24,4
] 10-15]	31	23,0
] 15-20]	25	18,5
> 20	19	14,1
Niveau scolaire		
Pas scolarisé	51	37,8
Primaire	74	54,8
Secondaire	10	7,4
Activités exposant directement aux fumées		
OUI	52	38,5
NON	80	59,3
Manquant	3	2,2
Tension artérielle TA (mm de Hg)		
Normo tendu	98	72,6
Hypertendu	37	27,4
Indice de Masse Corporelle (IMC) *		
Normal	95	70,4
Surpoids	11	8,1
Obèse	29	21,5

* selon l'OMS et l'International Obesity Task Force (1998)

Tableau 2 : Résultats du Programme de contrôle de qualité externe QMEQAS (2015-03)

Elément	Unités	Valeur cible échantillon 1	Valeur mesurée échantillon 1	Z-Score échantillon 1	Ecart acceptable échantillon 1
⁹ Be	µmol/L	1,83	1,87	0,15	[1,33 - 2,33]
²⁵ Mg			na	na	
⁵¹ V	nmol/L	45,3	39,7	- 0,75	[30,2- 60,4]
⁵² Cr	nmol/L	103	94,2	- 0,51	[68,7- 137]
⁵⁶ Fe			na	na	
⁵⁵ Mn	nmol/L	387	501	2,49	[295 - 479]
⁵⁹ Co	nmol/L	79,4	84,2	0,59	[63,4- 95,4]
⁶³ Cu	µmol/L	18,8	17,9	- 0,70	[16,2 - 21,4]
⁶⁴ Zn	µmol/L	17,7	15,5	-1,23	[14,1 - 21,3]
⁷⁵ As	nmol/L	189	217	0,91	[126 - 252]
⁸² Se	nmol/L	1,95	1,89	- 0,26	[1,46 - 2,44]
⁸⁸ Sr	nmol/L	1740	1560	-1,02	[1380 - 2100]
⁹⁸ Mo	nmol/L	24,2	27,3	0,68	[15,1 - 33,3]
¹¹¹ Cd	nmol/L	76,9	68,7	-1,26	[63,8 - 90,0]
¹¹⁸ Sn	nmol/L	12,8	10,5	- 0,74	[6,63 - 19,0]
¹²¹ Sb	nmol/L	57,1	58,8	0,30	[45,9 - 68,3]
¹³⁸ Ba	nmol/L	13,8	13,5	- 0,12	[8,46 - 19,1]
²⁰² Hg	nmol/L	10,2	8,33	- 1,09	[6,78 - 13,6]
²⁰⁸ Pb	µmol/L	0,567	0,535	- 0,80	[0,488 - 0,646]
²⁰⁹ Bi	nmol/L	8,64	7,56	-1,21	[6,86 - 10,4]

Tableau 3 : Contrôle qualité interne Seronorm™ L-2

Éléments	Moyennes cibles (µg/L)	Moyennes mesurées (µg/L)	Ecart type	CV*
⁹ Be	5,68	5,34	0,29	5%
²⁵ Mg	15400	13306	970	7%
⁵¹ V	6,00	5,36	0,36	7%
⁵² Cr	11,80	10,98	0,83	8%
⁵⁶ Fe	331000	307777	30841	10%
⁵⁵ Mn	29,9	30,4	2,2	7%
⁵⁹ Co	5,80	5,48	0,30	5%
⁶³ Cu	1330	1229	72	6%
⁶⁴ Zn	6500	5735	290	5%
⁷⁵ As	14,3	16,3	1,2	7%
⁸² Se	112,0	112,5	4,4	4%
⁸⁸ Sr	14,9	11,3	0,7	6%
⁹⁸ Mo	6,4	6,5	0,6	9%
¹¹¹ Cd	5,80	5,08	0,20	4%
¹¹⁸ Sn	5,70	5,37	0,18	3%
¹²¹ Sb	30,50	29,12	1,56	5%
¹³⁸ Ba	346,00	283,30	11,77	4%
²⁰² Hg	16,00	15,46	0,46	3%
²⁰⁸ Pb	310,0	295,4	8,9	3%
²⁰⁹ Bi	5,18	4,99	0,15	3%

*CV : Coefficient de variation

Tableau 4: Résultat des analyses des éléments traces ($\mu\text{g/L}$) dans le sang des ferblantiers (≥ 18 ans)

Éléments	LOQ	% < LOQ	Moyenne.	Dév. Std	Médiane	Minimum	Maximum
^9Be	0,01	41,44	0,09	0,08	0,06	< 0,01	0,41
^{25}Mg	1	0	28384	3239	28277	20635	38178
^{51}V	0,1	62,16	< 0,1	0,07	0,05	< 0,1	0,73
^{52}Cr	0,24	65,76	< 0,24	0,22	0,12	< 0,24	1,61
^{56}Fe	24,5	0	448466	89131	452667	144221	679804
^{55}Mn	0,1	0	13	3,8	12,9	5,1	33
^{59}Co	0,01	0	0,56	0,21	0,5	0,31	1,29
^{63}Cu	0,24	0	908	130	898	523	1353
^{64}Zn	2,15	0	4583	957	4587	2202	7416
^{75}As	0,02	0	7,4	2,7	6,7	3,2	19,3
^{82}Se	0,1	0	174,4	36	171	110,2	318,6
^{88}Sr	0,01	0	36,1	13,1	32,9	17,6	92,7
^{98}Mo	0,01	0	4,02	6,33	1,9	0,4	40,7
^{111}Cd	0,02	0	0,26	0,16	0,23	0,01	0,89
^{118}Sn	0,1	6,31	0,43	0,32	0,4	< 0,1	3,14
^{121}Sb	0,1	0	9,49	8,11	8,08	5,17	66,5
^{138}Ba	0,24	22,52	0,6	0,58	0,42	< 0,24	4,43
^{202}Hg	0,02	0	3,37	3,41	2,81	0,66	34,43
^{208}Pb	0,1	0	103,1	46,2	93,2	30,4	304,1
^{209}Bi	0,01	74,77	0,011	0,02	< 0,01	< 0,01	0,20

LOQ : Limite de quantification ; Dev Std : Déviation standard

Tableau 5 : Comparaison des concentrations sanguines (Pb, Hg, Cd) des ferblantiers (≥ 18 ans) avec les valeurs retrouvées chez les recycleurs de déchets électroniques au Ghana (Srigboh et al., 2016)

	Moyenne ^a /μgL ⁻¹	SD	Percentiles ^a /μgL ⁻¹				
			10%	25%	50%	75%	90%
Pb	103,1	46,2	55,0	70,9	93,2	121,6	168,5
	79,3	58,0	26,3	40,1	63,5	99,8	142,2
Hg	3,4	3,4	1,3	1,9	2,8	3,8	5,6
	1,8	1,4	0,5	0,7	0,9	1,3	2,4
Cd	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
	1,7	3,0	0,2	0,5	1,2	1,6	3,1

Notre étude chez les ferblantiers au Bénin
(Srigboh et al., 2016) chez les recycleurs au Ghana

Tableau 6 : Proportions de ferblantiers (≥ 18 ans) dont les concentrations sont supérieures aux VR95 de la population de référence de Cotonou

Elément	VR95 en µg/L de Cotonou (Yedomon et al, 2016)	95 ^{ème} P* Ferblantiers (≥18ans)	FERBLANTIERS (≥ 18 ans)
			Proportions (%) au-dessus des VR95 de Cotonou
⁹ Be	0,196	0,22	8,108
²⁵ Mg	34059	33389	2,703
⁵¹ V	0,16	0,15	4,505
⁵² Cr	0,99	0,58	1,802
⁵⁶ Fe	553716	573298	9,009
⁵⁵ Mn	25,14	18,56	0,901
⁵⁹ Co	1,30	1,01	0,00
⁶³ Cu	1027	1118	17,117
⁶⁴ Zn	6668	6121	1,802
⁷⁵ As	10,55	13,2	9,009
⁸² Se	205	243	13,514
⁸⁸ Sr	48,42	59,7	16,216
⁹⁸ Mo	3,16	17,6	22,523
¹¹¹ Cd	0,63	0,67	5,405
¹¹⁸ Sn	0,48	0,82	31,532
¹²¹ Sb	8,94	14,48	28,829
¹³⁸ Ba	0,99	1,72	18,018
²⁰² Hg	7,64	6,51	1,802
²⁰⁸ Pb	74,78	199,7	71,171
²⁰⁹ Bi	0,015	0,031	21,622

P* : percentiles ; VR95 : Valeurs de référence représentant le 95^{ème} percentile de la population générale

Figure 1 : Comparaison des plombémies chez les ferblantiers de plus de 18 ans et de moins de 18 ans

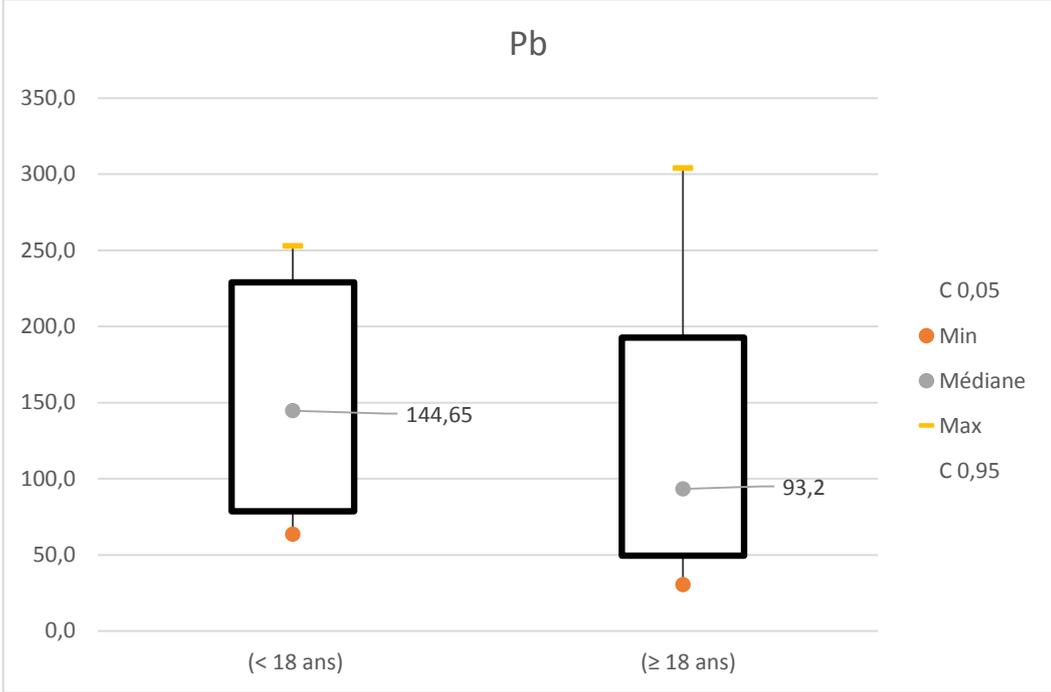
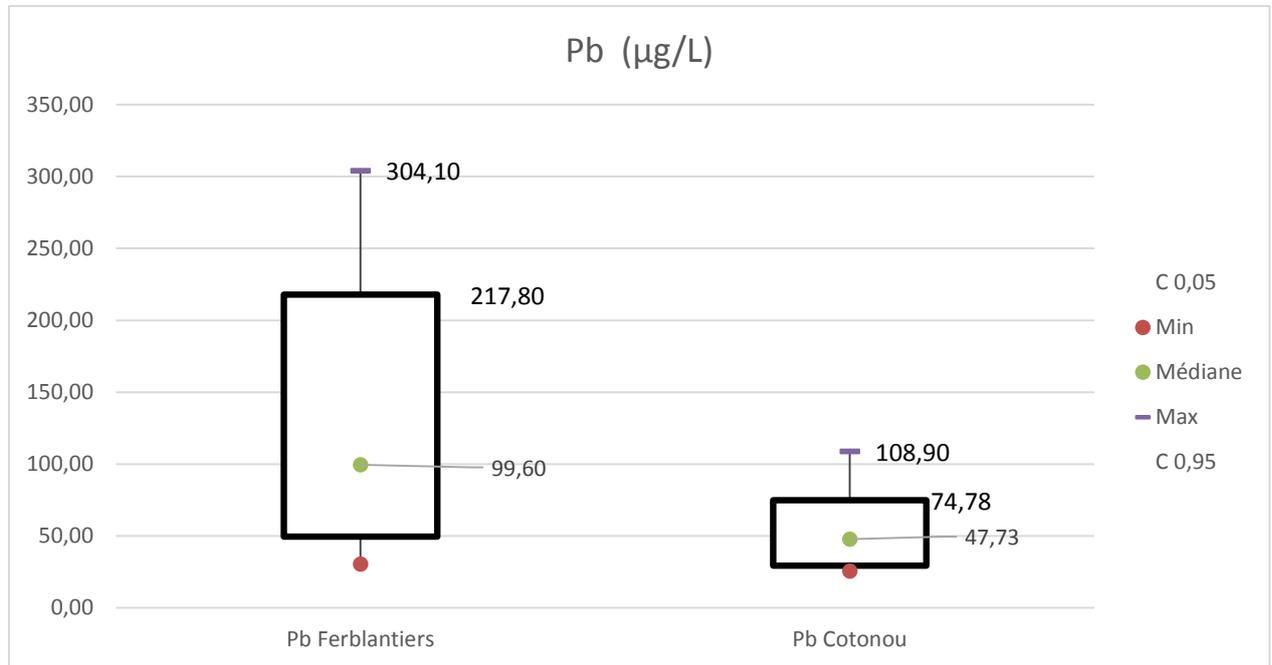
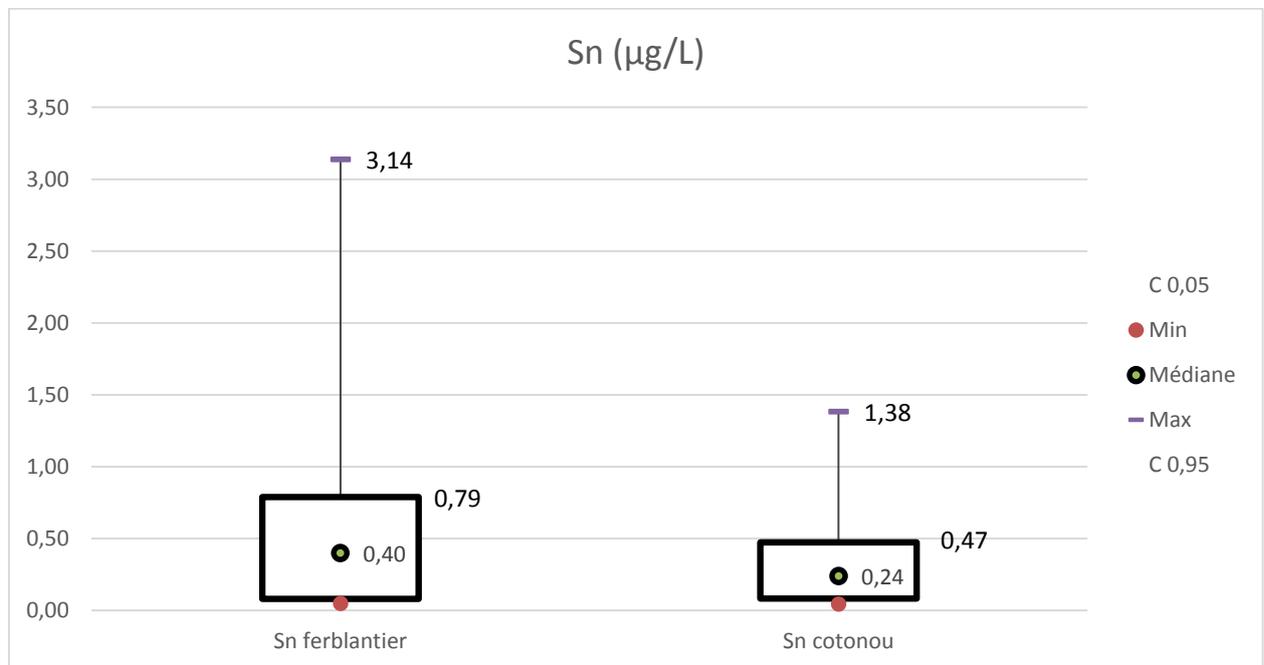


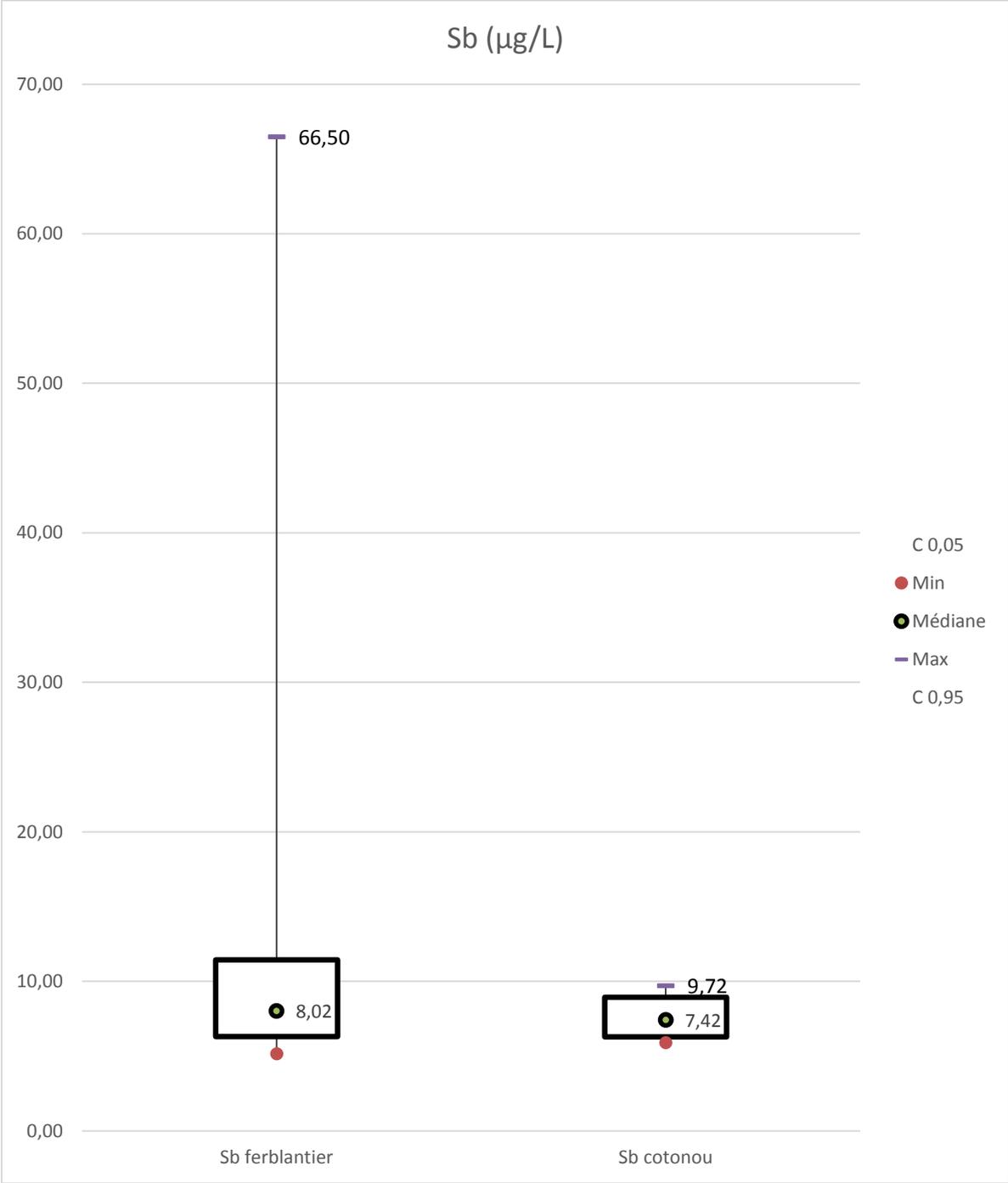
Figure 2 : Comparaison des concentrations sanguines ($\mu\text{g/L}$) des éléments Pb, Sn, Sb chez les ferblantiers adultes et en population générale au Bénin



Pb ($p < 0,0001$). Différence statistiquement significative



Sn ($p < 0,0001$). Différence statistiquement significative



Sb ($p < 0,0019$). Différence statistiquement significative

DISCUSSION GÉNÉRALE

III. Discussion générale

En Afrique, l'économie informelle contribue significativement au Produit National Brut (PNB), à la création d'emploi et à la génération des revenus de la majorité des citoyens. Largement étudié du point de vue économique, comme son nom l'indique, le travail dans l'économie informelle a un impact sanitaire qui gagnerait à être d'avantage exploré. Nos travaux de recherche ont concerné les artisans ferblantiers du site de Midombô à Cotonou. Les hommes sont les seuls à exercer le métier de ferblantier, compte tenu de la difficulté physique liée à l'exercice de cette activité. Les maitres artisans n'ont aucune possibilité de renforcement de leur capacité par la formation professionnelle continue. Ainsi les gestes et les conditions de travail, bien souvent précaires se transmettent de génération en génération avec un grand retard technologique.

Apprentissage, niveau de scolarisation et travail des enfants ferblantiers

- Scolarisation et travail des enfants

Dans notre étude, le niveau de scolarité, avant le début de l'activité professionnelle, était pour la majorité le niveau primaire (74 soit 54,8 %) et 51 personnes n'avait jamais été scolarisées (37,8 %). On peut constater que le taux de scolarisation des apprentis était presque 2 fois plus élevé par rapport aux maitres artisans (80,6 % des apprentis avaient été scolarisé contre 47% chez les maitres artisans). Cela s'explique par les campagnes de sensibilisation et les mesures de gratuité de l'école primaire mises en place au Bénin en 2006 (UNICEF BENIN, 2009). Toutefois ces mesures prises par le gouvernement béninois n'ont pas suffi à éliminer le travail des enfants. Le travail des enfants apprentis représente une problématique dans le milieu informel comme c'est le cas chez les ferblantiers au Bénin malgré la ratification des conventions 138 et 182 de l'OIT, portant respectivement sur l'âge minimum et sur les pires formes de travail des enfants (PFTE). Le taux des enfants économiquement occupés au Bénin, qui était de 34% selon les résultats de l'Enquête nationale sur le travail des enfants (INSAE, 2008), est passé à 52,5 % en 2014 selon l'enquête élaborée par l'UNICEF dans le cadre du programme international d'enquête-ménage (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2015). Il y a donc eu une augmentation de 18 % du travail des enfants en l'espace de 6 ans. Au sens de l'OIT et selon la liste des travaux dangereux publiés par le gouvernement béninois, le travail des apprentis ferblantiers de moins de 18 ans est classé comme faisant partie des PFTE. L'OIT et ses pays membres se sont fixés comme objectif d'éradiquer les PFTE d'ici 2016 (International Labour Office, 2013b). Bien que l'âge minimum d'admission des enfants au travail soit de 14 ans, un jeune de moins de 18 ans, employé ou en formation professionnelle, ne peut effectuer des travaux l'exposant à certains

agents chimiques toxiques. Comme nous pouvons le constater, les apprentis ferblantiers commençaient à travailler à un âge moyen de 11,9 ans alors que leurs maîtres artisans avaient commencé en moyenne à 13,6 ans. Cette tendance à travailler beaucoup plus tôt est liée à la pauvreté des ménages. En effet même si les jeunes apprentis ont été inscrits au cours primaire, ils rejoignent assez rapidement leurs parents dans les ateliers pour contribuer à l'amélioration des revenus de la famille.

Malgré les risques sur la santé des enfants liés à l'exécution de certaines tâches, les maîtres artisans ferblantiers ne comprennent pas pourquoi ils devraient se séparer de leurs enfants qui constituent pour eux une main d'œuvre importante, peu coûteuse et obéissante. Des opérations de sensibilisation en direction des parents et des employeurs doivent être menées et des formations professionnelles adaptées pour les enfants apprentis devraient permettre d'améliorer la situation de l'apprenti en milieu informel.

Expositions, état de santé et sécurité sociale des ferblantiers (apprentis et artisans)

L'absence d'équipements de protection est à l'origine d'expositions pouvant impacter la santé des ferblantiers. Les expositions identifiées au cours de nos travaux étaient diverses et concernaient surtout le bruit, les fumées et poussières métalliques. Les postures de travail et gestes répétitifs étaient également à l'origine de TMS chez les ferblantiers. Majoritairement exposés à des bruits impulsifs provenant des coups de marteau sur la ferraille, 29 % des apprentis ont présenté un déficit d'au moins 35 dB sur la meilleure oreille contre 57,7 % chez les artisans. Ce risque de fatigue auditive et ou de surdité professionnelle croît avec la durée d'exposition. Une investigation menée par Raouf Pereira au sujet de 13 artisans ferblantiers à Porto-Novo (sur initiative et financement CIPCRE-BENIN) avait également révélé que 77 % souffraient de troubles de l'audition à des degrés variés et 23 % souffraient d'hypertension artérielle (Cercle International pour la Promotion de la Création - Bénin, 2003). L'hypertension artérielle dans notre étude est en moyenne de 27,4 %, et est similaire à la prévalence nationale, qui est estimée à 29,9% en milieu urbain (Houehanou et al., 2015). Parmi les participants à l'étude, 32 ferblantiers (23,7 %) avaient déjà été vaccinés contre le tétanos mais seulement 16 avaient une vaccination datant de moins de 10 ans. Selon certains artisans, la vaccination pourrait abaisser leur immunité et être parfois à l'origine de maladies. Selon Monsieur X (ferblantier) : « *Les aiguilles des médecins ne me touchent pas, aucune piqûre n'est tolérée par mon organisme, sinon je tombe malade...* ». Il est donc nécessaire de sensibiliser et de mettre en place une politique vaccinale préventive contre le tétanos, pour les travailleurs informels de la branche métaux et constructions métalliques au Bénin.

Dans les ateliers l'irritation des voies aériennes supérieures ou oculaires avait pour origine : pour 27 personnes l'exposition aux poussières présentes dans l'atelier ; pour 23 personnes l'activation du feu de la forge ; pour 1 personne l'utilisation d'acide chlorhydrique.

L'état de délabrement des ateliers est souvent lié au manque d'espace de stockage des déchets métalliques. Le désordre caractérisant certains ateliers est un facteur de risque de blessures par les métaux.

Il est important d'observer que les travailleurs aptes à exercer des activités aussi physiques et contraignantes que celles des ferblantiers sont généralement en bonne santé. Cela est décrit par l'expression « Healthy worker effect » ou « l'effet du travailleur sain ». Selon ce concept, nos résultats pourraient minorer la gravité des conséquences sur la santé, dans la mesure où les plus faibles, en moins bonne santé, auraient déjà abandonné le travail et ne feraient donc pas partie de notre étude.

- Sécurité sociale

La Constitution du 11 décembre 1990 garantit à tout citoyen béninois une protection sociale. Toutefois les artisans du secteur informel ne bénéficient d'aucune sécurité sociale et adhèrent très peu aux cotisations proposées par les mutuelles de l'économie informelle, par manque de confiance. Le système privilégié est la tontine mutuelle. Les tontines mutuelles peuvent être définies comme des fonds d'épargne rotative où les levées bénéficient à chacun des participants, selon un ordre préétabli. Les tontines, au-delà d'être un moyen d'épargner ensemble et de bénéficier à tour de rôle de tout ou partie de cette épargne, peuvent complémentarément ou principalement jouer un rôle social, notamment en cas de maladies, d'accidents ou de décès (Ginneken, 1999).

Concentrations sanguines de référence en population générale à Cotonou

Pour répondre à l'objectif spécifique portant sur l'imprégnation en ETM chez les ferblantiers, nous avons mené une enquête de « Biomonitoring » ou surveillance biologique auprès des donneurs de sang du centre de transfusion sanguine de Cotonou. La connaissance de l'imprégnation de base de la population générale améliore la qualité des évaluations de risques en milieu professionnel. La qualité des résultats obtenus par ICP-MS a été garantie, par l'accréditation COFRAC NF ISO 15189 du laboratoire, avec notamment satisfaction aux contrôles de qualité externes (QMEQAS) et contrôles de qualité internes (SeronomTM).

Nous avons déterminé dans un premier temps, chez 70 donneurs de sang, les concentrations de 29 éléments traces métalliques dans le sang total. Il s'agissait d'une première détermination par ICP-MS au Bénin, de valeurs de références pour plusieurs éléments traces métalliques dans le sang. Les valeurs de référence en population générale,

sont des données qui aident les scientifiques, les acteurs de santé publique et les médecins à quantifier les expositions environnementales aux métaux et métalloïdes notamment en cas d'exposition excessive (Institut de veille sanitaire (France), 2011). L'avantage de la surveillance biologique est qu'elle intègre toutes les sources d'exposition telles que les expositions professionnelles, extraprofessionnelles, environnementales (atmosphère, eau, aliments) ou résultant du mode de vie du sujet. Au vu de nos résultats en population générale à Cotonou, parmi les 29 éléments traces analysés, le plomb, le manganèse, l'arsenic, le palladium, l'antimoine, le cobalt, le sélénium et le strontium ont montré des concentrations sanguines plus élevées que les valeurs de référence trouvées dans la littérature pour les populations européennes en bonne santé et non exposées. Ces données de référence (5^{ème} et 95^{ème} percentiles) obtenues sont toutefois limitées à la population masculine de 18 à 65 ans à Cotonou ce qui constitue une première étape dans la détermination des valeurs de référence.

L'interprétation des données concernant les biomarqueurs reste encore souvent difficile en raison de lacunes des connaissances scientifiques. Pour quelques polluants de l'environnement, comme le plomb, la recherche scientifique a apporté une bonne compréhension des risques pour la santé, associés aux différents niveaux de plomb sanguin. Les concentrations relativement élevées de la plombémie à Cotonou pourraient être liées à la pollution environnementale (transports, industries), domestique mais également à la consommation d'aliments contaminés (notamment fruits et légumes) (Nriagu, 1992; Dougnon et al., 2013; Koumolou et al., 2013). Au Bénin, l'interdiction du plomb dans l'essence a été mise en application seulement en 2005 alors qu'en France cette interdiction a été appliquée avant les années 2000, avec comme conséquence la réduction de la plombémie en population générale. De plus, la convention sur l'interdiction de la céruse (peinture blanche contenant du plomb) adoptée à Genève en 1921 n'a été ratifiée qu'en décembre 1960 au Bénin. Ce retard dans la mise en application de l'interdiction d'utilisation de la céruse implique que tous les habitats construits au Bénin avant les années 1960, dégradés ou récemment réhabilités, sont susceptibles d'être une source d'exposition au plomb.

Évaluation des imprégnations en éléments traces en milieu professionnel, chez les ferblantiers

La surveillance biologique est un outil important dans la protection de l'homme dans son activité professionnelle et pour le dépistage précoce des effets adverses des toxiques comme les métaux lourds. Cette étude chez les ferblantiers nous a permis de déterminer les concentrations pour 20 éléments traces chez 135 artisans et apprentis. Récemment, des travaux similaires ont été menés dans les matrices sang et urine chez des travailleurs informels, recycleurs de déchets électroniques à Agbogbloshie au Ghana, afin d'évaluer leur

niveau d'imprégnation en éléments traces métalliques (Srigboh et al., 2016). Les ferblantiers au Bénin sont des artisans informels impliqués dans le recyclage des déchets métalliques (fondeurs, ferblantiers, forgerons) et qui utilisent des métaux ferreux ou non ferreux comme matières premières dans leurs ateliers de production. La précarité des conditions de travail et l'absence d'équipements de protection sont des situations d'autant plus alarmantes que ces artisans sont exposés dès le plus jeune âge, au cours de l'apprentissage traditionnel (Tossou, 2001; Ayelo et al., 2010).

A l'exception du cadmium sanguin, les concentrations sanguines du plomb, du mercure chez les ferblantiers au Bénin, étaient supérieures aux concentrations retrouvées chez des recycleurs de déchets électroniques au Ghana (Srigboh et al., 2016). Environ 71 % des ferblantiers présentaient des plombémies supérieures aux 95^{ème} percentiles des concentrations retrouvées en population non exposée à Cotonou. Pour les moins de 18 ans, la prévalence des travailleurs ayant une plombémie $\geq 100 \mu\text{g/L}$ est de 83 %. En France, l'arrêté du 8 juin 2015 a défini un nouveau seuil de déclaration du saturnisme infantile, à partir d'une plombémie à **50 $\mu\text{g/L}$** (au lieu de 100 $\mu\text{g/L}$). Cette diminution du seuil de déclaration est liée au rapport de l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité sanitaire en France) sur les effets néfastes du plomb à des seuils inférieurs à 100 $\mu\text{g/L}$ (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, 2013).

Recommandations

➤ Exposition de la population générale aux métaux lourds : cas du plomb

L'exposition au plomb (valeurs de référence à Cotonou) est plus élevée en population générale par rapport aux pays Européens. Pour faire baisser ce niveau, il est urgent de mettre en place des mesures de contrôles des carburants vendus au Bénin et plus largement dans la sous-région, tout en luttant contre l'essence de contrebande. De plus, les personnes vivant dans des « maisons en mur » avec des peintures datant de la période de l'indépendance (année 1960) doivent être alertées et prendre des mesures de protection adéquates au cours des travaux de rénovation.

➤ Étapes progressives pour sortir de l'informalité et du travail des enfants (ferblantiers)

L'État n'a pas les moyens financiers de garantir la santé des travailleurs informels. En effet seulement 5 % des acteurs économiques (secteur formel), contribuent à hauteur de 99 % aux recettes fiscales nationales. Il paraît donc irréaliste qu'on invite le secteur informel majoritaire (plus de 90%) à intégrer un secteur minoritaire (formel) pour pouvoir bénéficier des assurances de santé. La mise en place d'un partenariat décentralisé de sécurité sociale, géré par les chefs de quartier, ou d'un partenariat public-privé d'assurance santé pour les travailleurs informels,

pourrait être une alternative au manque de confiance financière envers l'État central. Cela impose de profondes réflexions au niveau des choix prioritaires de développement.

Pour les enfants, il serait nécessaire d'attendre l'âge de 18 ans avant de les faire travailler comme apprenti à temps plein. Une formation technique professionnelle pour les enfants ferblantiers et une aide aux maîtres artisans pour moderniser progressivement leur production permettrait d'atteindre les objectifs de l'OIT contre le travail des enfants.

➤ **Suivi médical dans le travail informel (cas des ferblantiers)**

Un programme de santé au travail chez ces artisans pourrait comprendre :

- Un audiogramme annuel permettant de dépister les surdités professionnelles ;
- Un test visuel ;
- Un contrôle de la tension artérielle ;
- Un contrôle annuel de la plombémie en cas d'activités exposant directement aux fumées.

En fonction des expositions et des résultats des examens cliniques, le médecin du travail pourrait prescrire des épreuves fonctionnelles respiratoires (spirométrie), voire un électrocardiogramme d'effort selon l'âge et les antécédents cardiovasculaires. Par ailleurs la prophylaxie du tétanos nécessite la vaccination des artisans lors de campagnes (Rappel DTPolio tous les 10 ans). Enfin, la mise en place d'un dossier médical mentionnant les résultats des examens cliniques et des examens complémentaires pratiqués permettrait de suivre l'état de santé des artisans.

→ Autres mesures d'hygiène et de sécurité :

- Ne pas manger, ni boire dans les ateliers,
- Port de gants et de chaussures,
- Utilisation de masques de protection respiratoire,
- Utilisation de bouchons d'oreille.

Ces mesures d'hygiène et de sécurité sont relativement faciles à mettre en place et pourraient largement contribuer à diminuer l'impact des conditions rudimentaires de travail sur la santé des artisans.

Conclusion

Les travailleurs informels sont dans une situation de grande vulnérabilité du fait d'une faible couverture en matière de protection sociale et d'un niveau élevé d'exposition aux risques professionnels. L'amélioration de la santé et de la sécurité au travail chez les travailleurs dans l'économie informelle est donc une nécessité pour limiter les situations de maladies professionnelles associées à la précarité.

Les artisans ferblantiers au Bénin sont dépourvus d'équipements de protections et sont exposés à des facteurs de risques physiques, chimiques et biologiques. Le bruit et les fumées métalliques sont les principaux risques identifiés dans notre étude, se traduisant par des déficits auditifs plus ou moins importants et des niveaux d'imprégnation en métaux toxiques relativement plus élevés que dans la population générale, notamment pour le plomb.

Le travail des enfants reste encore une réalité dans cette branche d'activité de l'artisanat au Bénin. Des mesures doivent être mises en place pour réduire autant que possible cette réalité, à travers la mise en place de formations professionnelles adaptées aux réalités du travail dans les unités artisanales informelles. Enfin dans le cadre de la prévention de maladies professionnelles, la pratique des vaccinations et des visites médicales systématiques sont fortement recommandées, et pourraient être réalisées par le biais des équipes universitaires de santé au travail.

Préoccupé par l'état de vulnérabilité des populations, le gouvernement béninois envisage de reconstruire le système d'assurance sociale à travers un projet dénommé : « Assurance pour le renforcement du capital humain ». Un décret datant de Novembre 2016 du gouvernement Béninois, portant création d'un comité national de pilotage aura pour mission de définir le mécanisme global de protection sociale, permettant aux artisans de l'économie informelle d'accéder aux services sociaux de base à des couts réduits.

Références bibliographiques

- Afristat. Évolutions Internationales dans la mesure du secteur informel et de l'emploi informel, notes techniques N°01. 2010, 10 p.
- Agence Nationale de Sécurité Sanitaire. Expositions au plomb : effets sur la santé associés à des plombémies inférieures à 100 µg/L. 2013, 146 p.
- Akplogan Dossa, H.; Migan, C.; Sansuamou, P. Le secteur informel au Bénin: problématique et perspectives de contribution à l'économie nationale; Conseil Economique et Social: Bénin. 2011, 25 p.
- Alimonti, A.; Bocca, B.; Mannella, E.; Petrucci, F.; Zennaro, F.; Cotichini, R.; D'Ippolito, C.; Agresti, A.; Caimi, S.; Forte, G. Assessment of reference values for selected elements in a healthy urban population. *Ann. Dell'Istituto Super. Sanità.* 2005, 41 (2), 181–187.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2012 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and physical agents and Biological exposure Indices; ACGIH Signature Publications: Cincinnati, Ohio. 2012, 238p.
- Angerer, J.; Aylward, L. L.; Hays, S. M.; Heinzow, B.; Wilhelm, M. Human biomonitoring assessment Values: approaches and data requirements. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2011, 214 (5), 348–360.
- Assemblée Nationale. Loi N° 2015-42 portant institution du Régime d'Assurance Maladie Universelle en République Du Bénin ; Bénin, 2015.
- ATSDR. Toxicological Profile for Beryllium; US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2002, 290 p.
- Ayelo, P.; Baloïtcha, P.; Fayomi, B. Situation socio sanitaire des apprentis en milieu artisanal à Cotonou. *J Int Santé Trav.* 2010, 2, 31–39.
- Bacchetta, M.; Ernst, E.; Bustamante, J. P. Mondialisation et emploi informel dans les pays en développement; OMC: Genève. 2009, 208 p.
- Baeuml, J.; Bose-O'Reilly, S.; Gothe, R. M.; Lettmeier, B.; Roeder, G.; Drasch, G.; Siebert, U. Human Biomonitoring Data from mercury exposed miners in six artisanal small-scale gold mining areas in Asia and Africa. *Minerals.* 2011, 1 (1), 122–143.
- Benach, J.; Muntaner, C.; Santana, V.; Chairs, F. Employment conditions and health inequalities: final report to the WHO Commission on Social Determinants of Health; OMS. 2007, 172 p.
- Benach, J.; Solar, O.; Vergara, M.; Vanroelen, C.; Santana, V.; Castedo, A.; Ramos, J.; Muntaner, C.; EMCONET Network. Six employment conditions and health inequalities: a descriptive overview. *Int. J. Health Serv. Plan. Adm. Eval.* 2010, 40 (2), 269–280.
- Benjamin, N.; Mbaye, A. A. Les entreprises informelles de l'Afrique de l'Ouest francophone : taille, productivité et institutions ; Pearson: Montreuil. 2012, 273 p.
- Berlin, A.; Yodaiken, R. E.; Henman, B. A. Assessment of toxic agents at the workplace: roles of ambient and biological monitoring; Commission of the European Communities, Ed.; Boston : Hingham, MA. 1984, 634 p.
- Bocca, B.; Madeddu, R.; Asara, Y.; Tolu, P.; Marchal, J. A.; Forte, G. Assessment of reference ranges for blood Cu, Mn, Se and Zn in a selected Italian population. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2011, 25 (1), 19–26.
- Bonnefoy, C. Dosage d'éléments traces dans les liquides biologiques par spectrométrie de masse inorganique couplée à un plasma induit par haute fréquence (ICP-MS) : mise en œuvre D'une Chambre de Réaction Dynamique (DRC); thèse présentée à la Faculté des arts et des

sciences en vue de l'obtention du grade de Doctorat Ph.D, Université Claude Bernard Lyon I: France. 2005, 182 p.

Bonnefoy, C.; Menudier, A.; Moesch, C.; Lachâtre, G.; Mermet, J.-M. Determination of chromium in whole blood by DRC–ICP–MS: spectral and non-spectral interferences. *Anal. Bioanal. Chem.* 2005, 383 (2), 167–173.

Bourrelier, P.-H.; Berthelin, J.; Pédro, G. Contamination des sols par les éléments en traces: les risques et leur gestion; technique et documentation Lavoisier: Paris. 1998, 438 p.

Bulat, Z. P.; Dukic-Cosic, D.; Dokic, M.; Bulat, P.; Matovic, V. Blood and urine cadmium and bioelements profile in nickel-cadmium battery workers in Serbia. *Toxicol. Ind. Health.* 2009, 25 (2), 129–135.

Bureau international du travail. Emploi et protection sociale dans le secteur informel, Conseil d'administration 277e Session ; Genève. 2000, 19 p.

Bureau international du travail. Micro-assurance santé : guide d'introduction aux mutuelles de santé en Afrique. 2002, 74 p.

Bureau, S.; Fendt, J. Entrepreneurship in the informal economy: Why it matters. *Int. J. Entrep. Innov.* 2011, 12 (2), 85–94.

Canagarajah, S.; Sethuraman, S. V. Social protection and the informal sector in developing countries: challenges and opportunities; Report N°130. 2000, pp 23–25.

CDC. Fourth national report on human exposure to environmental chemicals. 2015, 1095 p.

Cercle International pour la Promotion de la Création - Bénin. Artisanat de Recyclage Des Déchets Métalliques : Enjeux et Défis ; Porto-Novo. 2003, 147 p.

Cesareo, R.; Viezzoli, G. Trace element analysis in biological samples by using XRF spectrometry with Secondary Radiation. *Phys. Med. Biol.* 1983, 28 (11), 1209–1218.

Cesbron, A.; Saussereau, E.; Mahieu, L.; Couland, I.; Guerbet, M.; Goullé, J.-P. Metallic profile of whole blood and plasma in a series of 106 healthy volunteers. *J. Anal. Toxicol.* 2013, 37 (7), 401–405.

Charmes, J. The contribution of informal sector to GDP in developing countries: assessment, estimates, methods, orientation for the future. 2000, 14 p.

Charmes, J. Les Origines du concept de secteur informel et La récente définition de l'emploi Informel; IRD: Paris. 2005, 31 p.

Charmes, J. The informal economy worldwide: trends and characteristics. *Margin J. Appl. Econ. Res.* 2012, 6 (2), 103–132.

Chen, M. A. The informal economy: recent Trends, future directions. *New Solut. J. Environ. Occup. Health Policy NS.* 2016, 26 (2), 155–172.

Choi, Y.-H.; Hu, H.; Mukherjee, B.; Miller, J.; Park, S. K. Environmental cadmium and lead exposures and hearing loss in U.S. adults: The National Health and Nutrition Examination Survey, 1999 to 2004. *Environ. Health Perspect.* 2012, 120 (11), 1544–1550.

Coelho, P.; Costa, S.; Costa, C.; Silva, S.; Walter, A.; Ranville, J.; Pastorinho, M. R.; Harrington, C.; Taylor, A.; Dall'Armi, V.; et al. Biomonitoring of several toxic metal(loid)s in different biological matrices from environmentally and occupationally exposed populations from Panasqueira mine area, Portugal. *Environ. Geochem. Health.* 2013, 36 (2), 255–269.

Conférence internationale des statisticiens du travail. Résolution concernant les statistiques de l'emploi dans le secteur informel ; Genève. 1993, 15 p.

Conférence internationale du travail. Travail décent et économie informelle : sixième question à l'ordre du jour ; Bureau international du travail : Genève. 2002, 150 p.

- Conférence internationale du travail. Cadre promotionnel pour la sécurité et la santé au travail : quatrième question à l'ordre du jour ; Bureau international du travail: Genève. 2005, 15 p.
- Conseil Economique et Social. L'artisan béninois : vie, problèmes et perspectives ; CES, République du Bénin. 2010, 42 p.
- Crevoisier, O., Hainard, F. Isher, P. L'économie Informelle : Une alternative à l'exclusion économique et sociale ? Commission suisse pour l'UNESCO : Berne. 2007, 210 p.
- Darrouzes, J. Spectromètre de masse à Plasma à Couplage Inductif (ICP-MS) à cellule de collision/réaction (CC/R) pour l'analyse clinique. Performances et applications à L'analyse élémentaire et à la spéciation. *Ann. Toxicol. Anal.* 2007, 19 (1), 103–111.
- Davoudoun, C. C. Artisanat au Bénin : textes législatifs et réglementaires ; Editions Ruisseaux d'Afrique ; Bureau d'Appui aux Artisans : Kindonou; Cotonou. 2007, 625 p.
- Daza, J. L. Economie Informelle, Travail non déclaré et administration du travail ; Bureau International du Travail: Genève. 2005, 79 p.
- Dehon, B.; Nisse, C.; Lhermitte, M.; Haguenoer, J.-M. Métaux et médecine du travail. *Ann. Toxicol. Anal.* 2001, 13 (3), 203–219.
- Delépine, A.; Chapoutier-Guillon, A.; Jacquin-Brisbart, C.; Nolland, X.-B.; Vidal, V. Les Maladies Professionnelles. Guide D'accès Aux Tableaux du régime général et du régime agricole de la sécurité sociale ; INRS ED 835. 2015, 360 p.
- DFG. Deutsche Forschungsgemeinschaft. List of MAK and BAT Values 2010. Commission for the investigation of health hazards of chemical compounds in the work Area. Report N°46. 2010, 255 p.
- Dougnon, V.; Edoth, P.; Bankolé, H.; Dougnon, J.; Klotoé, J. R.; Loko, F.; Creppy, E. E.; Boko, M. [Presence of lead in leaves of *Solanum macrocarpon* cultivated in Cotonou (Benin): role of poorly composted poultry manure]. *C. R. Biol.* 2013, 336 (5–6), 261–264.
- Draghici, C.; Jelescu, C.; Dima, C.; Coman, G.; Chirila, E. Heavy metals determination in environmental and biological samples. In *Environmental heavy metal pollution and effects on child mental development*; Simeonov, L. I., Kochubovski, M. V., Simeonova, B. G., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht. 2011, 1, 145–158.
- Farzin, L.; Amiri, M.; Shams, H.; Ahmadi Faghieh, M. A.; Moassesi, M. E. Blood levels of lead, cadmium, and mercury in residents of Tehran. *Biol. Trace Elem. Res.* 2008. 123 (1–3), 14–26.
- García-Ubaque, J. C.; Riaño-Casallas, M. I.; Benavides-Piracón, J. A. [Informal employment, unemployment and underemployment: a matter of public health]. *Rev. Salud Pública Bogotá Colomb.* 2012, 14 Suppl 1, 138–150.
- Gérin, M.; Gosselin, P.; Cordier, S.; Viau, C.; Quénel, P.; Déwailly, E. Environnement et santé publique: fondements et pratiques; Edisem: Acton Vale, Québec. 2003, 1062 p.
- Gërkhani, K. The informal sector in developed and less developed countries: a literature survey. *Public Choice.* 2004, 120 (3), 267–300.
- Gil, F.; Hernández, A. F. Toxicological importance of human biomonitoring of metallic and metalloid elements in different biological samples. *Food Chem. Toxicol.* 2015, 80, 287–297.
- Gil, F.; Hernández, A. F.; Márquez, C.; Femia, P.; Olmedo, P.; López-Guarnido, O.; Pla, A. biomonitorization of cadmium, chromium, manganese, nickel and lead in whole blood, urine, axillary hair and saliva in an occupationally exposed population. *Sci. Total Environ.* 2011, 409 (6), 1172–1180.
- Ginneken, W. van. Social security for the excluded majority: case-studies of developing countries; ILO: Geneva. 1999, 198 p.

Goullé, J.-P.; Mahieu, L.; Castermant, J.; Neveu, N.; Bonneau, L.; Lainé, G.; Bouige, D.; Lacroix, C. Metal and metalloid multi-elementary icp-ms validation in whole blood, plasma, urine and hair. *Reference Values. Forensic Sci. Int.* 2005, 153 (1), 39–44.

Goullé, J.-P.; Sausserieau, É.; Mahieu, L.; Coulant, I.; Plougonven, S.; Guerbet, M.; Lacroix, C. Validation du dosage du chrome par icp-ms avec cellule de collision dans les matrices biologiques et concentrations usuelles. *Ann. Toxicol. Anal.* 2011, 23 (4), 211–216.

Gouzy, A.; Ducos, G. La connaissance des éléments traces métalliques : un défi pour la gestion de l'environnement. N°75. *Air Pur.* 2008, 6–10.

Hart, K. Informal income opportunities and urban employment in ghana. *J. Mod. Afr. Stud.* 1973, 11 (1), 61–89.

Heitland, P.; Köster, H. D. Biomonitoring of 37 trace elements in blood samples from inhabitants of northern germany by ICP–MS. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2006, 20 (4), 253–262.

Houehanou, Y. C. N.; Lacroix, P.; Mizehoun, G. C.; Preux, P.-M.; Marin, B.; Houinato, D. S. Magnitude of cardiovascular risk factors in rural and urban areas in benin: findings from a nationwide steps survey. *PloS One* 2015, 10 (5), 1-13.

Huneault, C.; Labrie, D.; Lafortune, C.; Malboeuf, M. Monographie sur les risques a la sante des ferblantiers dans le secteur de la construction; Ministère des affaires sociales: département de sante communautaire, hôpital général de Montreal. 1984, 67 p.

Igue, J. Le Secteur informel au Bénin, état des lieux pour sa meilleure structuration, projet d'appui au secteur privé; Laboratoire d'Analyse Régionale et d'Expertise Sociale: Cotonou. 2008, 54 p.

INRS. Stratégie d'évaluation de l'exposition et comparaison aux valeurs limites. Fiche A1/V01. 2005, 22 p.

INRS. Mesure des expositions aux agents chimiques et biologiques. Surveillance biologique des expositions - risques - INRS <http://www.inrs.fr/risques/mesure-expositions-agents-chimiques-biologiques/surveillance-biologique-exposition.html> (accessed Aug 25, 2016).

INRS. Base de données Biotox - Publications et outils <http://www.inrs.fr/publications/bdd/biotox.html> (accessed Oct 5, 2016).

INSAE. Cahier des villages et quartiers de ville, Département Du Littoral. 2004, 14 p.

INSAE. Enquête nationale sur le travail des enfants au Bénin ; BIT/IPEC : Bénin. 2008, 170 p.

Institut de veille sanitaire (France). Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement. Tome 1; Institut de veille sanitaire: Saint-Maurice. 2011, 154 p.

Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique. Rapport thématique artisanat : Les entreprises artisanales au Bénin. 2010, 67 p.

Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique. Enquête modulaire intégrée sur les conditions de vie des ménages- Rapport_final_emicov_2011 ; Bénin. 2011, 171 p.

Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique. Evaluation de la pauvreté au Bénin ; Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique/Banque mondiale. 2013, 127–152.

Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique. Enquête par grappes à indicateurs multiples (MICS) 2014, résultats clés ; INSAE/ UNICEF : Bénin. 2015, 15 p.

International Labour Office. L'apprentissage dans l'économie informelle en Afrique : rapport d'atelier ; BIT : Genève. 2007, 77 p.

International Labour Office. Guide sur les nouveaux indicateurs d'emploi des objectifs du millénaire pour le développement : y compris l'ensemble complet des indicateurs du travail décent ; BIT: Genève. 2009, 50 p.

International Labour Office. La prévention des maladies professionnelles : journée mondiale de la sécurité et de la santé au travail, 28 avril 2013 ; BIT: Genève. 2013a, 13 p.

International Labour Office. Rapport mondial sur le travail des enfants : vulnérabilité économique, protection sociale et lutte contre le travail des enfants. 2013b, 116 p.

Ivanenko, N. B.; Ivanenko, A. A.; Solovyev, N. D.; Zeimal', A. E.; Navolotskii, D. V.; Drobyshev, E. J. Biomonitoring of 20 trace elements in blood and urine of occupationally exposed workers by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*. 2013, 116, 764–769.

Kanté, S. Le secteur informel en Afrique subsaharienne francophone : vers la promotion d'un travail décent; BIT: Genève. 2002, 70 p.

Khelifi, R.; Olmedo, P.; Gil, F.; Feki-Tounsi, M.; Hammami, B.; Rebai, A.; Hamza-Chaffai, A. Biomonitoring of cadmium, chromium, nickel and arsenic in general population living near mining and active industrial areas in southern Tunisia. *Environ. Monit. Assess.* 2013, 186 (2), 761–779.

Knudsen, L.; Merlo, D. F. Biomarkers and human biomonitoring; Issues in Toxicology; Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2011, Vol 1, 471 p.

Koumolou, L.; Edoth, P.; Montcho, S.; Aklikokou, K.; Loko, F.; Boko, M.; Creppy, E. E. Health-Risk market garden production linked to heavy metals in irrigation water in Benin. *C. R. Biol.* 2013. 336 (5–6), 278–283.

Kromhout, H. Occupational hygiene in developing countries: something to talk about? *Ann. Occup. Hyg.* 1999. 43 (8), 501–503.

Laamech, J.; Bernard, A.; Dumont, X.; Benazzouz, B.; Lyoussi, B. Blood lead, cadmium and mercury among children from urban, industrial and rural areas of Fez Boulemane region (Morocco): relevant factors and early renal effects. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health.* 2014. 27 (4), 641–659.

Lauwerys, R. R. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelle ; Elsevier Masson: Paris. 2007, 662 p.

Lauwerys, R. R.; Hoet, P. Industrial chemical exposure: guidelines for biological monitoring, Third Edition; CRC Press. 2001, 388-390.

Leblanc, A.; Lapointe, S.; Beaudet, A.; Côté, I.; Dumas, P.; Labrecque, F.; Lamy, C.; Larochelle, J.; Lepage, L.; Pelletier, F.; et al. Étude sur l'établissement de valeurs de référence d'éléments traces et de métaux dans le sang, le sérum et l'urine de la population de la grande région de Québec ; Institut national de santé publique Québec: Montréal. 2004, 133 p.

Loewenson, R. H. Health impact of occupational risks in the informal sector in Zimbabwe. *Int. J. Occup. Environ. Health.* 1998, 4 (4), 264–274.

Massaro, E. J. Handbook of human toxicology; Chemical Rubber Company, Ed.; CRC Press: Boca Raton, Fla., 1997, 1111 p.

Maurizio, R. Labour Informality in Latin America: the case of Argentina, Chile, Brazil and Peru, Brooks World Poverty Institute Working Paper No. 165; Rochester, NY. 2012, 29 p.

McKelvey, W.; Gwynn, R. C.; Jeffery, N.; Kass, D.; Thorpe, L. E.; Garg, R. K.; Palmer, C. D.; Parsons, P. J. A Biomonitoring study of lead, cadmium, and mercury in the blood of New York city adults. *Environ. Health Perspect.* 2007, 115 (10), 1435–1441.

Medeiros, D.; Wildam, R.; Liebes, R. Metal metabolism and toxicities. In handbook of human toxicology; Massaro Edward. 1997, pp 150–170.

Michalke, B.; Rossbach, B.; Göen, T.; Schäferhenrich, A.; Scherer, G. Saliva as a matrix for human biomonitoring in occupational and environmental medicine. *Int. Arch. Occup. Environ. Health.* 2014, 88 (1), 1–44.

Ministère de la santé. Régime d'Assurance Maladie Universelle (RAMU) <http://www.beninsante.bj/spip.php?article76>.

Moesch, C. Utilisation de l'ICP-MS en biologie clinique. *Ann. Toxicol. Anal.* 2007, 19 (1), 11–21.

Moubé, M. Des Principes de responsabilité et de solidarité pour un accès financier équitable aux soins de santé : le cas des travailleurs de l'informel urbain du Cameroun en situation de vulnérabilité ; thèse présentée à la Faculté des arts et des sciences en vue de l'obtention du grade de Doctorat Ph.D en Sciences humaines appliquées, option Bioéthique. Université de Montréal. 2015, 367 p.

Moure-Eraso, R.; Flum, M.; Lahiri, S.; Tilly, C.; Massawe, E. A review of employment conditions as social determinants of health part II: the workplace. *New Solut. J. Environ. Occup. Health Policy NS.* 2006. 16 (4), 429–448.

Muir, J. Employment, Incomes and equality: a strategy for increasing productive employment in Kenya (report of an inter-agency team financed by the United Nations Development Programme and Organised by the International Labour Office, Geneva. *Relat. Ind.* 1974, 29 (1), 232–234.

Muller, M.; Mairiaux, P. Promotion de la santé en milieu de travail : modèles et pratiques ». *Santé Publique.* 2008, 20, 161–169.

Muntaner, C.; Solar, O.; Vanroelen, C.; Martínez, J. M.; Vergara, M.; Santana, V.; Castedo, A.; Kim, I.-H.; Benach, J.; EMCONET network. Unemployment, informal work, precarious employment, child labor, slavery, and health inequalities: pathways and mechanisms. *Int. J. Health Serv. Plan. Adm. Eval.* 2010, 40 (2), 281–295.

Nanosciences et innovation pour les matériaux la biomédecine. Analyse par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) http://iramis.cea.fr/nimbe/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=348 (accessed Oct 4, 2016).

Nriagu, J. O. Toxic metal pollution in Africa. *Sci. Total Environ.* 1992, 121, 1–37.

OCDE. L'emploi informel dans les pays en développement : une normalité indépassable?. 2009, 8 p.

OIT. Convention concernant la norme minimum de la sécurité sociale. 35ème session CIT : Genève, 1952. [Cité le 03 08 2016]. Disponible sur : http://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_INSTRUMENT_ID,P12100_LANG_CODE:312247,fr

Olade, M. A. Heavy metal pollution and the need for monitoring: illustrated for developing countries in West Africa In: Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment. By T. C. Hutchinson and K. M. Meema; John Wiley & Sons Ltd. 1987, 20, 335-41.

ONU. Le programme de développement durable à l'horizon 2030 : résolution adoptée par l'assemblée générale le 25 septembre 2015, transformer notre monde : 2015. [Cité 21 sept 2016]. Disponible sur : <http://www.un.org/fr/africa/osaa/peace/sdgs.shtml>

Organisation de Coopération et de Développement Économiques. Manuel sur la mesure de l'économie non observée. 2003, 260 p.

Organisation Internationale du Travail ; Organisation Mondiale du Commerce. Mondialisation et emploi informel dans les pays en développement - Résumé de l'étude conjointe réalisée par l'OIT et l'OMC. 2009, 12 p.

Paucot, H. État de l'art et derniers développements en ICP-MS. *Ann. Toxicol. Anal.* 2007, 19 (1), 3–10.

- Pesqueux, Y. De l'économie informelle ; CNAM, Département Management, Innovation, Prospective. 2014, 11 p.
- Pillière, F.; Conso, F.; Institut national de recherche et de sécurité (France). Biotox guide biotoxicologique pour les médecins du travail : inventaire des laboratoires effectuant des dosages biologiques de toxiques industriels : Paris : INRS; 2007, 252 p.
- Ricaud, M. Les fumées de soudage et des techniques connexes, INRS. 2012, 32 p.
- Röllin, H.; Mathee, A.; Levin, J.; Theodorou, P.; Wewers, F. Blood manganese concentrations among first-grade schoolchildren in two south african cities. *Environ. Res.* 2005, 97 (1), 93–99.
- Rousseau, S. « Capabilities, risques et vulnérabilités », in *Pauvreté et développement socialement durable*, Dubois J-J., Lachaud J-P, Montaud J-M., Pouille A.; (eds), PUB, Bordeaux. 2003, 14 p.
- Safier, M. Casual work and poverty in third world cities. *Public Adm. Dev.* 1981, 1 (1), 91–92.
- Schultze, B.; Lind, P. M.; Larsson, A.; Lind, L. Whole blood and serum concentrations of metals in a Swedish population-based sample. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 2014, 74 (2), 143–148.
- Société française de médecine du travail (SFMT). Surveillance biologique des expositions professionnelles aux agents chimiques. Recommandations de bonne pratique. *Ref. sant. Trav.* 2016, 146 : 65-93.
- Srigboh, R. K.; Basu, N.; Stephens, J.; Asampong, E.; Perkins, M.; Neitzel, R. L.; Fobil, J. Multiple elemental exposures amongst workers at the Agbogbloshie electronic waste (E-Waste) site in Ghana. *Chemosphere.* 2016, 164, 68–74.
- Swuste, P.; Eijkemans, G. Occupational safety, health, and hygiene in the urban informal sector of Sub-Saharan Africa: an application of the prevention and control exchange (pace) program to the informal-sector workers in healthy city projects. *Int. J. Occup. Environ. Health.* 2002, 8 (2), 113–118.
- Takala, J. Introductory Report: Decent work – safe work; International Labour Office, XVIIIth World Congress on Safety and Health at Work: Orlando. 2005, 50 p.
- Theuri, C. K. Small-Scale enterprises and the informal sector in Kenya. *African Newsletter on Occupational Health and Safety.* 2012, pp 32–34.
- Thiery, L.; Meyer-Bisch, C. Hearing Loss due to partly impulsive industrial noise exposure at levels between 87 and 90 dB (A). *J. Acoust. Soc. Am.* 1988, 84 (2), 651–659.
- Tossou, F. Évaluation des conditions de travail et de l'état de santé des enfants dans le secteur informel au Bénin : cas des apprentis ferblantiers de Cotonou. In *Archives des maladies professionnelles et de médecine du travail* ; Masson. 2001; Vol. 62, pp 385–387.
- Tuakuila, J.; Kabamba, M.; Mata, H.; Mata, G. Toxic and essential elements in children's blood (<6 years) from Kinshasa, DRC (the Democratic Republic of Congo). *J. Trace Elem. Med. Biol. Organ Soc. Miner. Trace Elem. GMS* 2014, 28 (1), 45–49.
- UNICEF BENIN. L'éducation : une lueur d'espoir vers l'OMD 2 <https://www.unicef.org/benin/education.html> (accessed Nov 22, 2016).
- Vicens, F. Indicateurs biologiques d'effets précoces. Leur utilisation dans la prévention du risque chimique en santé au travail. *Ref. En Santé Au Trav.* 2015, 141, 23–33.
- Vodounou, C.; Yacouba, D.; Biaou, A. Enquête sur le travail des enfants au Benin - 2008, BIT-INSAE.; Bureau international du travail et Institut national de la statistique et de l'analyse économique du Bénin. 2009, 170 p.
- Volkoff, S.; Thébaud-Mony, A. Santé au travail : l'inégalité des parcours. In *Les inégalités sociales de santé* ; La Découverte. 2000 ; pp 349–361.

Walther, R. La Formation professionnelle en secteur informel : rapport sur l'enquête terrain au Bénin ; Agence Française de Développement. 2006, 50 p.

World Health Organization. Biomarkers in risk assessment : validity and validation. Geneva : WHO, Environmental Health Criteria 222; Genève. 2001, 238 p.

World Health Organization, Regional Office for Europe. Human biomonitoring: facts and figures; Copenhagen. 2015, 104 p.

Annexes

Annexe 1 : Note d'information « ferblantiers ».....	152
Annexe 2 : Formulaire de Consentement libre et éclairé « FERBLANTIERS ».....	153
Annexe 3 : Note d'information « Donneur de sang ».....	154
Annexe 4 : Formulaire de Consentement libre et éclairé des Donneurs de sang.....	155
Annexe 5 : Questionnaire : Enquête de détermination des concentrations en éléments métalliques chez les donneurs de sang à COTONOU.....	156
Annexe 6 : Engagement de confidentialité.....	158
Annexe 7 : Questionnaire individuel socio-professionnel et médical.....	159
Annexe 8 : Fiche de prélèvement.....	162
Annexe 9 : Questionnaire ateliers et études de postes.....	163
Annexe 10 : Autorisations administratives.....	169

Annexe 1 : Note d'information « ferblantiers »

Monsieur,

Cette enquête s'inscrit dans une démarche globale de mise en place d'une visite médicale de santé, chez les artisans exerçant pour la plupart dans l'économie informelle.

L'environnement de travail peut être inconfortable et le port d'équipements de protection rare. Les forgerons ferblantiers n'échappent pas à ces observations et vos conditions de travail peuvent être pénibles et vous exposés à différents risques professionnels pouvant avoir un impact sur votre santé. L'utilisation de la forge, d'outils tranchants, de métaux ou d'acides vous exposent à la survenue de blessures, de brûlures lors de situations accidentelles. Mais cette activité est également sources d'expositions à des produits chimiques comme le monoxyde de carbone, les vapeurs de plomb, d'étain, de cuivre, ou d'aluminium...). Les conséquences à long terme pour votre santé ne sont pas négligeables et des maladies peuvent survenir comme certaines maladies respiratoires, cardiaques, neurologiques ou des surdités.

Pour étudier les risques professionnels liés à votre activité de ferblantier, nous souhaitons mettre en place une étude d'évaluation des conditions de travail afin de proposer, si cela est nécessaire, des actions correctrices dans une démarche de prévention.

Pour ce faire, nous souhaitons réaliser une étude de vos conditions de travail en évaluant les gestes et les ambiances dans les ateliers où vous travaillez ainsi qu'un examen médical pour évaluer votre état de santé.

Votre activité nécessitant le travail des métaux qui peuvent s'accumuler dans votre organisme, nous souhaitons également évaluer si les concentrations de ces métaux dans votre sang est importante et supérieure à celle retrouvée dans le reste de la population béninoise.

Je vous propose, si vous le voulez bien, de participer à cette étude dans le but de nous aider à mieux connaître votre travail, votre état de santé et de dépister d'éventuelles maladies en lien avec votre activité de ferblantier.

En acceptant de participer à cette étude, vous devez savoir que vous ne percevrez aucune indemnité à part celle correspondant à votre transport jusqu'au centre de santé. Un échantillon de votre sang (5 ml) sera prélevé pour réaliser le dosage biologique en métaux lourds. Cette analyse sera réalisée dans un laboratoire Français spécialisé dans ce type de dosage. En cas de résultats anormaux, vous serez averti et orientés vers un médecin pour un suivi plus approfondi.

Votre participation contribuera à améliorer les connaissances pour mieux prévenir les maladies professionnelles et permettra, à terme, une meilleure prise en charge des personnes travaillant dans la filière métallique.

Annexe 2 : Formulaire de Consentement libre et éclairé « FERBLANTIERS »

IMPACT SANITAIRE LIÉ AU TRAVAIL DES FERBLANTIERS EXERÇANT DANS LE CADRE DE L'ÉCONOMIE INFORMELLE A COTONOU (BÉNIN)

Unité d'enseignement et de recherche en santé au travail et environnement (Ureste)
Département Sante Publique (FSS)

Unité de NeuroEpidémiologie tropicale, UMR-INSERM 1094, Université de Limoges

Je certifie avoir donné mon accord pour participer à l'étude de santé au travail et de détermination des concentrations sanguines en éléments métalliques et éléments traces, chez les FERBLANTIERS DE MIDOMBÔ.

J'accepte volontairement de participer à cette étude et je comprends que ma participation n'est pas obligatoire.

Au cours de cette étude, j'accepte que soient recueillies des données sur mon état de santé, mes habitudes tabagiques, médicamenteuses et professionnelles susceptibles d'être à l'origine d'une accumulation de métaux lourds et d'éléments traces métalliques.

Je comprends que les informations recueillies sont strictement confidentielles et à usage exclusif des investigateurs concernés.

J'ai été informé que mon identité n'apparaîtra dans aucun rapport ou publication et que toute information me concernant sera traitée de façon confidentielle. J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette étude puissent être conservées dans une base de données et faire l'objet d'un traitement informatisé non nominatif.

Par la présente, j'accepte de participer à l'étude.

Nom et prénom du volontaire : _____

Date : / ___ / ___ / _____ /

Signature ou emprente de la personne :

Identifiant du volontaire: _____

INVESTIGATEUR : je confirme que j'ai donné les informations sur l'étude à la personne et/ou à ses parents (ou représentant légal) et que je lui ai remis une copie de la note d'information et du formulaire de consentement éclairé.

Les informations sur l'étude ont été données par :

Nom de l'Investigateur : _____

Date : / ___ / ___ / _____ /

Signature de l'Investigateur :

Annexe 3 : Note d'information « Donneur de sang »

Etude chez les donneurs de sang à l'agence Nationale de transfusion sanguine à COTONOU

La présence de métaux lourds dans l'organisme peut être responsable d'une toxicité pour l'Homme et être à l'origine de la survenue de maladies respiratoires, cardiaques, hématologiques, digestives, neurologiques voire de cancers. Certaines activités professionnelles comme la « filière métallique » peuvent fortement exposer les salariés qui y travaillent et entraîner des concentrations sanguines très élevées de ces métaux avec pour conséquence la survenue de maladies.

Cependant, la pollution de l'air ou de l'eau, de même que l'alimentation peuvent également conduire à une exposition à certains contaminants métalliques comme le plomb, le cadmium ou le mercure.

Alors, comment différencier la part liée à l'activité professionnelle de celle liée à l'environnement ?

Il n'existe pas aujourd'hui, dans la population béninoise, d'études qui ont définies précisément les concentrations sanguines de ces métaux.

Vous êtes donneurs de sang et vous ne travaillez pas dans la « filière métallique », cette étude vous concerne.

Pourquoi participer à cette recherche.

- 1 Pour nous aider à déterminer les valeurs usuelles dans la population béninoise en métaux lourds dans le sang.**
- 2 Pour savoir si vous avez une concentration sanguine élevée à l'un des 30 métaux lourds recherchés.**
- 3 Pour contribuer à faire avancer la recherche et les connaissances sur les risques liés aux métaux lourds au Bénin.**

Il n'appartient qu'à vous de décider.

Si vous souhaitez y prendre part, il vous sera tout d'abord demandé des informations relatives à votre statut tabagique et à votre métier. Un échantillon de votre sang (5 ml) sera prélevé en supplément de votre don de sang pour réaliser le dosage biologique en métaux lourds. Cette analyse sera réalisée dans un laboratoire Français spécialisé dans ce type de dosage. En cas de résultats anormaux, vous serez averti et orientés vers un médecin pour un suivi plus approfondi.

Annexe 4 : Formulaire de Consentement libre et éclairé des Donneurs de sang

DETERMINATION DES CONCENTRATIONS SANGUINES EN ELEMENTS METALLIQUES DANS UNE POPULATION NON EXPOSEE PROFESSIONNELLEMENT A COTONOU

Unité d'enseignement et de recherche en santé au travail et environnement (Ureste)
Département Sante Publique (FSS)

Unité de NeuroEpidémiologie tropicale, UMR-INSERM 1094, Université de Limoges

Agence Nationale de Transfusion Sanguine

Je certifie avoir donné mon accord pour participer à l'étude sur la détermination des concentrations sanguines en éléments métalliques et éléments traces, en population générale masculine non exposée au plan professionnel.

J'accepte volontairement de participer à cette étude et je comprends que ma participation n'est pas obligatoire.

Au cours de cette étude, j'accepte que soient recueillies des données sur mes habitudes tabagiques, alimentaires, médicamenteuses et professionnelles susceptibles d'être à l'origine d'une accumulation de métaux lourds et d'éléments traces métallique. Je comprends que les informations recueillies sont strictement confidentielles et à usage exclusif des investigateurs concernés.

J'ai été informé que mon identité n'apparaîtra dans aucun rapport ou publication et que toute information me concernant sera traitée de façon confidentielle. J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette étude puissent être conservées dans une base de données et faire l'objet d'un traitement informatisé non nominatif.

Par la présente, j'accepte de participer à l'étude.

Nom et prénom du volontaire : _____

Date : /___/___/_____/ **Signature ou emprunte de la personne :**

Identifiant du volontaire: _____

INVESTIGATEUR : je confirme que j'ai donné les informations sur l'étude à la personne et/ou à ses parents (ou représentant légal) et que je lui ai remis une copie de la note d'information et du formulaire de consentement éclairé.

Les informations sur l'étude ont été données par :

Nom de l'Investigateur : _____

Date : /___/___/_____/ **Signature de l'Investigateur :**

Annexe 5 : Questionnaire : Enquête de détermination des concentrations en éléments métalliques chez les donneurs de sang à COTONOU

INITIALES (3 premières lettres du nom et première lettre prénom) : _____

IDENTIFIANT : _____

1. Date du jour : / _____ / _____ / _____ /

2. Date de naissance : / _____ / _____ / _____ /

3. Taille. (Mètres) : / _____ /

4. Poids (kilogrammes) : / _____ /

5. Tension artérielle (mmHg) : / _____ // _____ /

HABITUDES TABAGIQUES

6. Fumez-vous ou avez-vous déjà fumé la cigarette sur une base régulière ? Non Oui

Si non, passez à la question n° 7.

Si oui, nombre d'années :

Nombre approximatif de cigarettes par jour :

Si vous êtes un ex-fumeur de cigarettes, depuis combien de temps avez-vous cessé?

7. Fumez-vous ou avez-vous déjà fumé régulièrement la pipe ou le cigare ?? Non Oui

Si non, passez à la question n° 8.

Si oui, nombre d'années

Nombre approximatif de cigare ou cigarettes par jour.....

Si vous êtes un ex-fumeur, depuis combien de temps avez-vous cessé ?

HABITUDES MÉDICAMENTEUSE ET CONSOMMATION ALIMENTAIRE

8. Prenez-vous régulièrement un traitement médicamenteux ? Non Oui

Si oui, lesquels (nom du médicament) :

.....

9. Consommez-vous régulièrement du poisson ou autres produits de la mer ? Non Oui

Si oui, nombre de fois par semaine en moyenne fois

PROTHESES

10. Portez-vous une prothèse métallique ou encore un amalgame dentaire ? Non Oui

10. a- type de prothèse :

.....

10. b- depuis combien de temps ?

CURSUS PROFESSIONNEL

11. Veuillez nous décrire vos 3 derniers emplois en commençant par votre emploi actuel (si vous travaillez actuellement) ou par le plus récent (si vous ne travaillez pas en ce moment) ?

Métier : _____

Date de début : /_____/ Date de fin : /_____/

Type d'entreprise : _____

Principale fonction : _____

Métier : _____

Date de début : /_____/ Date de fin : /_____/

Type d'entreprise : _____

Principale fonction : _____

Métier : _____

Date de début : /_____/ Date de fin : /_____/

Type d'entreprise : _____

Principale fonction : _____

VEHICULES ET EXPOSITION AUX GAZS D'ECHAPPEMENTS
--

12- La plupart du temps vous vous déplacez en voiture 1 OUI 2 NON

Si Oui, le véhicule est-il climatisé ? 1 OUI 2 NON

Annexe 6 : Engagement de confidentialité

Je soussigné (e) _____, m'engage à respecter la confidentialité des données qui seront recueillies pour le projet de recherche : **IMPACT SANITAIRE LIÉ AU TRAVAIL DES FERBLANTIERS EXERCANT DANS LE CADRE DE L'ÉCONOMIE INFORMELLE, cas du 3e Arrondissement de COTONOU** dont le responsable de l'étude au Bénin est le Professeur Benjamin Fayomi.

Par cet engagement, je prends conscience et m'engage à :

- Ne pas transmettre quelconque information et ou questionnaire relatif à ce projet à d'autres personnes que les membres de l'équipe de recherche affectés à ce projet.
- Respecter le fait que les données sont la seule propriété des membres de l'équipe de recherche et, de ce fait, elles ne peuvent être transmises à aucun tiers.
- Garder confidentielles les données de recherche (sous toutes ses formes) et respecter le fait que seuls les résultats AGRÉGÉS et généraux peuvent être diffusés après que le chercheur principal de ce projet en ait donné l'autorisation.
- Mettre à l'abri des regards, les questionnaires et données recueillis en les conservant dans un classeur fermé dans les bureaux ou laboratoires de recherche, lequel étant situé dans un local fermé à clé.

Nom et prénom : _____

Date : / ___ / ___ / _____ **Signature :**

Annexe 7 : Questionnaire individuel socio-professionnel et médical

FICHE INDIVIDUELLE D'ENQUETE

Travail dans la filière « Métaux et constructions métalliques »
(E2FER.....)

Identifiant :

Nom et prénom de l'artisan:

Tel : |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|

Atelier: _ _ _ Date Interview: |_|_| / |_|_| / |_|_|_|_|

A/Groupe : 1 Chef atelier 2 Ouvrier

3 Apprentis 4 Employé occasionnel

B/Date de naissance : |_|_| / |_|_| / |_|_|_|_| ou Age : |_|_| ans

C/Sexe : 1 Homme 2 Femme

D/Depuis combien de temps exercez-vous dans cet atelier ? ___ Mois ____ Année

E/ Cotisez -vous pour une prévoyance dans le cadre de l'assurance santé ?

1 OUI 0 NON

NIVEAU SCOLAIRE, HABITUDES PROFESSIONNELLES

F/Quel est votre niveau scolaire:

1 N'a jamais fréquenté 2 Cours primaire 3 Cours secondaire

4 Autres types de cursus

Précisez.....

G/Combien d'heures travaillez-vous en moyenne/ jour?

.....

H / Combien de jours travaillez-vous par semaine ?

.....

I/ Avez-vous une pause pendant la journée ?

1 OUI 0 NON Si Oui quelle durée :

QUESTIONNAIRE MÉDICAL

IDENTIFIANT :

I/TENSION ARTERIELLE :

K/POIDS :

L/TAILLE :

M/ETES VOUS VACCINÉ CONTRE LE TETANOS?

1-OUI depuis combien d'années ?.....

2- NON Vacciné 3 -NE SAIS PAS

N/EXAMEN VISUEL :

Avez-vous des problèmes visuels ?	1 <input type="checkbox"/> OUI	0 <input type="checkbox"/> NON
Port de corrections ?	1 <input type="checkbox"/> OUI	0 <input type="checkbox"/> NON
Acuité visuelle : OD	OG	CATARACTE

O/ AUDIOGRAMME. PERTE AUDITION Oreille Droite Oreille Gauche

I-Symptômes respiratoires :

1/ Fumez-vous ? 1 OUI 0 NON

Si le travailleur a répondu « OUI » passez à 1.A et B

1. A- Depuis quand ?.....Mois.....Années ?

1. B- Nombre de cigarettes en moyenne par jour ?.....

2/ Toussez-vous habituellement 1 OUI 0 NON

Si le travailleur a répondu « OUI » passez à 2A

2. A- Au moins 3 mois par an ? 1 OUI 0 NON

3/ Crachez-vous habituellement? 1 OUI 0 NON *Si le travailleur a répondu « OUI » passez à 3A*

3.A- Au moins 3 mois par an ? 1 OUI 0 NON

4- Etes-vous asthmatique ? 1 OUI 0 NON

Si le travailleur a répondu « OUI » passez à 4A et B

4. A- Combien de crises par an.....

4.B- Quel traitement ou médicament prenez-vous ? Ventoline Autres . . . Précisez :
.....

5-Avez-vous déjà vu un pneumologue ? 1 OUI 0 NON

Questionnaire supplémentaire sur les symptômes pulmonaires et irritatifs

Quand vous êtes à votre poste de travail, vous arrive t'il :

6-de vous mettre à tousser.....1 OUI 0 NON

7-de vous mettre à avoir des sifflements ou des cillements dans la poitrine en respirant ?..... 1 OUI 0 NON

8-de commencer à vous sentir essoufflé (e)1 OUI 0 NON

9-d'avoir le nez qui coule ou qui se bouche..... 1 OUI 0 NON

10-d'avoir une crise d'éternuements..... 1 OUI 0 NON

11- d'avoir les yeux qui picotent ou pleurent ?..... 1 OUI 0 NON

Si le (ou la) travailleur (euse) a répondu « OUI » a au moins une des questions,

Veillez préciser dans quelles circonstances
.....

12-Est-ce que ce ou ces problèmes à votre travail s'améliorent ou disparaissent en fin de semaine ou quand vous êtes en vacances ? 1 OUI 0 NON

Annexe 8: Fiche de prélèvement

FICHE DE PRÉLEVEMENT

FICHE DE RENSEIGNEMENTS ACCOMPAGNANT L'ÉCHANTILLON

Identifiant : _ _ _

ETIQUETTE

Date de prélèvement : _ _ / _ _ / _ _

Heure de prélèvement :

Tabagisme : 1 OUI 0 NON

Métier : FERBLANTIER

AUTRE

.....

Moment de prélèvement :

Début de semaine : début de poste

Fin de semaine : fin de poste

EXPOSITION

Exposition directement aux fumées OUI 0 NON

Exposé le jour même du prélèvement : 1 OUI 0 NON

Exposé la veille du prélèvement : 1 OUI 0 NON

Exposé la semaine précédente 1 OUI 0 NON

Annexe 9 : Questionnaire ateliers et études de postes

ATELIER N° _____

Date : ___/___/___ NOM Prénoms chef atelier : _____

TEL : _____

1- Nombre de personnel dans l'atelier?

1. a__ __ Apprentis

1. b__ __ Ouvriers

1. c __ __ Chef d'atelier ou artisan

2- Activités de l'atelier ?

Fabrication de grillages P1

Fabrication de lampions P2

Fabrication de Serrures et objets de décoration..... P3

Fabrication des arrosoirs..... P4

Fabrication de fourneaux..... P5

Forge..... P6

Vente de fer..... P7

Autres activités :

3- Postes Existants ?

a- Découpage b- Allumage et entretien feu c-Nettoyage et polissage ou brossage avec une meule métallique

d-Brasage/ collage e- Vente f- Autres

Précisez : _____

4- Nombre d'heures de travail /semaine

Jours	L	M	M	J	V	S	D
Horaires							

Total heures hebdomadaires : __ __H

5- Ou prenez-vous votre repas pendant la journée.

- a- Au sein de l'atelier b- Sur le site, à un endroit réservé c- En dehors du site

6- Quels sont les outils utilisés ?

- a-Poinçons
- b-Pointeaux
- c-Marteau
- d-Burin
- e- Rails
- f-Tambours

- g-Ciseaux
- h-Compas
- i- Équerre
- j-Autres
-
-

.....
7- Quels sont les métaux utilisés ?

.....
.....
8- Utilisez-vous des solvants organiques et ou autres produits chimiques (peintures, acides) ? 1 OUI 0NON

Si oui citez-les :

-
• Acide chlorhydrique

Autres.....

CONNAISSANCE ET CONDUITE FACE A LA SECURITE SOCIALE, LA RETRAITE ET LES PROBLEMES DE SANTÉ

9- Avez-vous adhérer à un organisme de prise en charge en cas de problème de santé ?

a-Pour vous-même 1 OUI 0NON

b-Pour vos salariés 1 OUI 0NON

SI NON pourquoi n'êtes-vous pas affilié ?

Déficit d'information

Crainte d'escroquerie.

Peur d'une faillite

Cout élevé.....

Autres, Précisez

10- Connaissez-vous les institutions d'assurance santé en cas de maladies et ou en cas d'accidents au travail ?

1 OUI 0NON Précisez dans la liste suivante :

Sociétés d'assurance Caisse de prévoyance sociale RAMU

11- Souscrivez-vous à l'une des cotisations suivantes pour votre prévoyance retraite ?

Tontine

Epargne en banque,

Epargne à la CLCAM

Garde des sous à domicile

Mutuelle

Autres

Étude de poste

Dénomination du poste					
Effectif à ce poste					
Circulation au poste et autour	0-Bonne circ <input type="checkbox"/> 1-Passable <input type="checkbox"/>				
Présence d'Équipements de protection Citez-les :	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/>				
Postures Défavorable et contraignante	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/>				
Description	Assis <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Accroupi <input type="checkbox"/> Penché <input type="checkbox"/>	Assis <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Accroupi <input type="checkbox"/> Penché <input type="checkbox"/>	Assis <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Accroupi <input type="checkbox"/> Penché <input type="checkbox"/>	Assis <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Accroupi <input type="checkbox"/> Penché <input type="checkbox"/>	Assis <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Accroupi <input type="checkbox"/> Penché <input type="checkbox"/>

<p align="center">Gestes répétitifs</p>	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/> Nature du geste :	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/> Nature du geste :	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/> Nature du geste :	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/> Nature du geste :	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/> Nature du geste :
<p align="center">Nuisances physiques</p> 0/ communication facile à voix normale ; 1/ Communication difficile et voix haute nécessaire sur une distance de 2m; 2- Communication difficile et voix haute nécessaire sur une distance de moins de 1m;	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>
<p align="center">Nuisances chimiques et fumées</p> 0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain ou odeurs perceptibles <input type="checkbox"/> 2-Risque certain ou fumées visibles <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>	0-Abs risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain <input type="checkbox"/> 2-Risque certain <input type="checkbox"/>
<p align="center">Ambiance thermique</p>	0-Absence de risque <input type="checkbox"/> 1-Risque incertain ou sensation de chaleur <input type="checkbox"/> 2-Risque certain ou forte chaleur <input type="checkbox"/>				
<p align="center">En cas d'accidents disposez-vous d'une boîte à pharmacie</p>	0-Non <input type="checkbox"/> 1-Oui <input type="checkbox"/>				
<p align="center">Durée et fréquence du travail à ce poste</p> 1/ Occasionnelle 2/ Fréquente 3/ permanente	1/ ≤1H/Jr <input type="checkbox"/> 2/ [1h-4H/Jr] <input type="checkbox"/> 3/ Sup4H/J <input type="checkbox"/>	1/ ≤1H/Jr <input type="checkbox"/> 2/ [1h-4H/Jr] <input type="checkbox"/> 3/ Sup4H/J <input type="checkbox"/>	1/ ≤1H/Jr <input type="checkbox"/> 2/ [1h-4H/Jr] <input type="checkbox"/> 3/ Sup4H/J <input type="checkbox"/>	1/ ≤1H/Jr <input type="checkbox"/> 2/ [1h-4H/Jr] <input type="checkbox"/> 3/ Sup4H/J <input type="checkbox"/>	1/ ≤1H/Jr <input type="checkbox"/> 2/ [1h-4H/Jr] <input type="checkbox"/> 3/ Sup4H/J <input type="checkbox"/>
<p align="center">Mesure du bruit</p>	A/ AF Max L		B/ AF Leq		C/ Max P

Annexe 10 : Autorisations administratives



RÉPUBLIQUE DU BÉNIN
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
INSTITUT DES SCIENCES BIOMÉDICALES APPLIQUÉES
I. S. B. A.

**Comité d'Ethique de la Recherche
CER-ISBA**

DECISION ETHIQUE FAVORABLE

N°74 du 15/09/2015

LE PRESIDENT
A
**Monsieur FAYOMI Benjamin
et Collaborateurs**

Monsieur,

Votre protocole de recherche intitulé « **Impact sanitaire lié au travail des ferblantiers exerçant dans le cadre de l'économie informelle à Cotonou (Bénin)** » a été évalué par le Comité d'Ethique de la Recherche de l'ISBA composé des membres suivants:

- Karim DRAMANE	- Lucie AYI-FANOU
- Fatiou TOUKOUROU	- Roch HOUNGNIHIN
- Thérèse AGOSSOU	- Reine AZIFAN
- Marius KEDOTE	- Zabulon DJARRA
- Christelle NDARAH	- Théodora KANGNI EHOZOU
- Adolphe KPATHAVI	- Priscilla POSSY BERRY QUENUM

Sur la base de :

1. documents suivants soumis le 1^{er} juillet 2015 :
 - résumé du protocole de recherche ;
 - protocole de recherche ;
 - avis scientifiques ;
 - budget de recherche ;
 - chronogramme détaillé ;
 - notes d'information et formulaires de consentement ;
 - fiche de prélèvement ;
 - questionnaires ;

1/2

01 B.P. 918 Tél. : 21 30 55 65 E-mail : isba@intnet.bj COTONOU (République du Bénin)
Site Web : www.isbabenin.com

- engagement de confidentialité ;
 - autorisation de l'Agence Nationale pour la Transfusion Sanguine (ANTS) à transférer les données biologiques ;
 - autorisation du médecin responsable de la polyclinique ERASME ;
 - CVs des doctorants et des directeurs de recherche ;
 - engagement du Directeur à respecter les principes éthiques ;
2. de vos réponses aux commentaires du comité sur votre dossier et de la nouvelle version du protocole de recherche, de la note d'information et du formulaire de consentement soumis le 1^{er} septembre 2015 ;

le comité d'éthique de la recherche de l'ISBA a évalué les aspects scientifiques et éthiques conformément aux normes nationales en vigueur.

Par conséquent, le CER-ISBA vous accorde **sa décision favorable** pour la mise en œuvre de la recherche au Bénin.

Cette décision est valable pour une période d'un (01) an à compter de sa date de signature.

Par ailleurs, le CER-ISBA vous demande de :

- 1) L'informer de toute nouvelle information / modification, qui surviendrait à une date ultérieure à cette approbation-ci et qui impliquerait des changements dans le choix des sujets, dans la manière d'obtenir leur consentement, les risques encourus survenant dans le cadre du déroulement de cette recherche. Le CER-ISBA doit, en effet, dans ces cas, réévaluer et donner une nouvelle approbation avant l'entrée en vigueur desdites modifications ;
- 2) Utiliser les documents qu'il a validés (protocole, notes d'information, formulaires de consentement, etc.) ;
- 3) Conserver dans vos dossiers, les versions originales des formulaires de consentement signés par les participants de recherche ou leurs témoins ;
- 4) Lui adresser **un rapport annuel** de la recherche.

Tout en vous souhaitant pleins succès pour la réalisation de votre recherche, le CER-ISBA vous remercie pour la confiance à lui accordée.

Cotonou, le 15 septembre 2015

Le Vice-Président



Prof. Fatiou TOUKOUROU





République du Bénin

MINISTÈRE DE LA SANTÉ

Secrétariat Général du Ministère



AGENCE NATIONALE POUR LA TRANSFUSION SANGUINE

N° 052 /MS/ANTS/SP

Cotonou, le 25 JUIN 2015

AUTORISATION

Je soussigné Ludovic Y. ANANI, Directeur Général de l'Agence Nationale pour la Transfusion Sanguine, autorise après avis de l'équipe dirigeante lors d'une présentation du protocole d'étude faite le Vendredi 20 Mars 2015, que le Doctorant Brice YEDOMON inclue les donneurs bénévoles de sang comme témoins dans l'étude intitulée « Impact sanitaire lié au travail des ferblantiers exerçant dans le cadre de l'économie informelle à Cotonou (Bénin) ».

Ladite étude sera réalisée sous la supervision du Professeur FAYOMI Benjamin de la FSS à Cotonou et des Professeurs MÆSCH Christian et DRUET- CABANAC Michel de la Faculté de Médecine de LIMOGES.

Cette étude, qui se déroulera entre juillet et août 2015 à l'Antenne Départementale Atlantique/Littoral de l'ANTS, vise les objectifs suivants :

- Déterminer le niveau de la concentration de 30 métaux lourds recherchés chez les donneurs de sang ;
- Contribuer à faire avancer la recherche et les connaissances sur les risques liés aux métaux lourds au Bénin ;
- Contribuer à la détermination des valeurs usuelles de métaux lourds dans le sang au Bénin.


Le
Directeur
Général
Agence Nationale pour la Transfusion Sanguine

Prof. Ag. Ludovic Y. ANANI

Ampliations :

- DGA : 01
- DT : 05
- ANTS-A/L : 01



République du Bénin

MINISTÈRE DE LA SANTÉ

Secrétariat Général du Ministère

AGENCE NATIONALE POUR LA TRANSFUSION SANGUINE



N° 053 /MS/ANTS/SP

Cotonou, le 12 5 JUIN 2015

AUTORISATION DE TRANSFERT DE DONNÉES BIOLOGIQUES

Je soussigné, Ludovic Y. ANANI, Directeur Général de l'Agence Nationale pour la Transfusion Sanguine, autorise après avis de l'équipe dirigeante le transfert des échantillons sanguins prélevés dans le cadre de l'étude « Impact sanitaire lié au travail des ferblantiers exerçant dans le cadre de l'économie informelle à Cotonou (Bénin) ».

La dite étude sera réalisée sous la supervision du Professeur FAYOMI Benjamin de la FSS de Cotonou et des Professeurs MOESCH Christian et DRUET-CABANAC Michel de la Faculté de Médecine de LIMOGES.

Les échantillons sanguins prélevés seront conservés dans un premier temps au « Programme National de Lutte contre les Maladies Non Transmissibles » puis seront transportés vers le CHU de Limoges en France par le biais d'une entreprise spécialisée dans le transport de matériel biologique (Transporteo).

Sur ces échantillons sanguins, il a été convenu de déterminer le niveau de la concentration de 30 métaux lourds recherchés dans le sang total.


Le Directeur Général
Agence Nationale pour la Transfusion Sanguine

Prof. Ag. Ludovic Y. ANANI

Ampliations:

- DGA: 01
- DT: 05

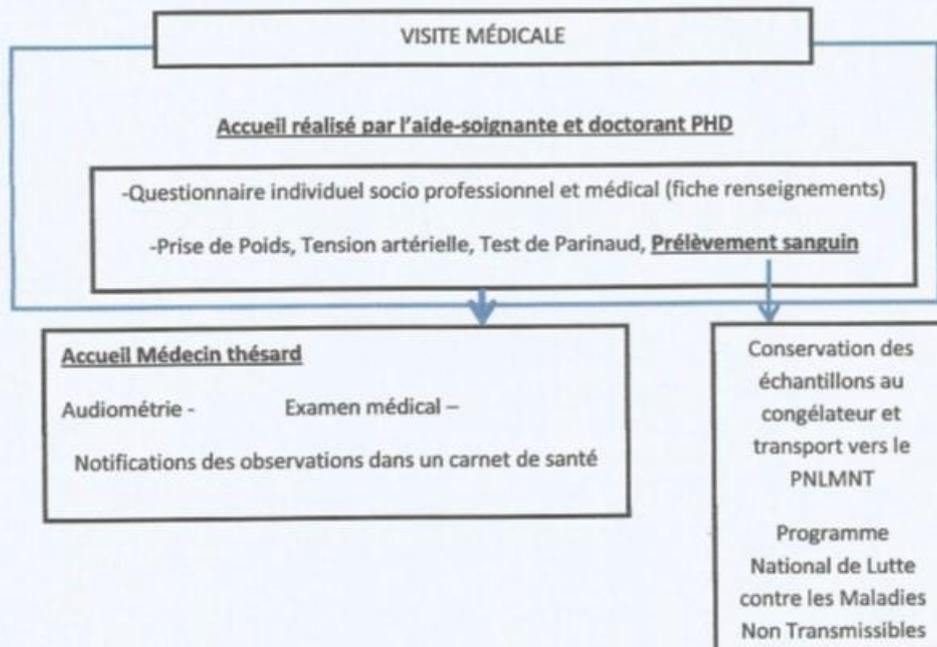
POLYCLINIQUE ERASME

Je soussigné Docteur
AGUEMON BADIROU

Médecin responsable de la Polyclinique ERASME, atteste que la visite médicale prévue dans le cadre de l'étude portant sur : « **IMPACT SANITAIRE LIÉ AU TRAVAIL DES FERBLANTIERS EXERÇANT DANS LE CADRE DE L'ÉCONOMIE INFORMELLE A COTONOU (BÉNIN)** » se déroulera au sein de nos locaux, sis dans le 3^e arrondissement de Cotonou.

Au cours de cette étude, il est prévu une visite médicale qui s'étalera sur une durée 30 jours.

Cette visite médicale sera réalisée selon le protocole conformément au schéma suivant :



Nous délivrons la présente attestation au Dr Brice YEDOMON, Doctorant chargé de l'étude, afin de faire valoir ce que de droit.

Signature

ENCADRÉS ET PHOTOS

ENCADRÉS :

Encadré 1 : Informalité et les quatre piliers du travail décent (90^{ème} session de la Conférence internationale du Travail, 2002) 13

Encadré 2 : L'activité de forgeage des forgerons-ferblantiers..... 26

PHOTOGRAPHIES :

Photos 1 : Artisans ferblantiers au travail dans un atelier de Cotonou (YEDOMON, 2015)

Forgeage au soufflet traditionnel avec roue..... 26

Soudage avec un fer à souder..... 27

Table des illustrations

Figure 1 : Place du secteur informel dans le monde (Bacchetta et al., 2009).....	6
Figure 2 : Variation des taux d’informalité à l’intérieur des régions (Bacchetta et al., 2009).....	9
Figure 3 : Evolution de l’emploi selon le type de l’emploi de 2006 à 2011	17
Figure 4 : Taux de présence de l’informel dans les différentes branches d’activité au Bénin (Akplogan Dossa et al., 2011).....	22
Figure 5 : Origine de la contamination par les éléments traces métalliques	30
Figure 6 : Appareillage et principe de l’ICP-MS.....	43
Figure 7 : Appareil ICP-MS NexION 350 D utilisé au laboratoire du CHU de Limoges ..	47
Figure 8 : Place de la surveillance biotoxécologique en milieu professionnel	50
Figure 9 : Les différents marqueurs utilisés en biosurveillance humaine (Vicens, 2015)	54
Figure 10 : Carte de la ville de Cotonou située au sud du Bénin	86
Figure 11 : Schéma montrant les différentes étapes de l’étude chez les ferblantiers ...	87

Table des tableaux

Tableau 1 : Critères de définition des entreprises du secteur informel (Afristat, 2010) ...	4
Tableau 2 : Evolution du taux de chômage des 15-64 ans entre 2006 et 2011	19
Tableau 3 : Prestations et taux de remboursements de la Caisse Mutuelle de Prévoyance Sociale Source : Ministère du Travail, République du Bénin	20
Tableau 4 : Conditions de bénéfice de la Caisse Mutuelle de Prévoyance Sociale (CMPS) et formations sanitaires concernées Source : Ministère du Travail, République du Bénin	21
Tableau 5 : Groupes sociaux concernés par le RAMU	22
Tableau 6 : Répartition selon la forme juridique des entreprises artisanales au Bénin	24
Tableau 7 : Classification des métiers dans la filière Métaux et constructions métalliques à Cotonou Source : (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2010)	25
Tableau 8 : Classification audiométrique des déficiences auditives selon le BIAP*	29
Tableau 9 : Oligo-éléments essentiels à l'organisme marqués en fond gris	31
Tableau 10 : Principales manifestations cliniques de quelques éléments métalliques toxiques	32
Tableau 11 : Signification toxicologique et utilisation des différentes matrices biologiques dans le cadre de la surveillance biologique humaine des éléments traces métalliques	41
Tableau 12 : Interférents potentiels pour les masses entre 50 et 80	45
Tableau 13 : Principales méthodes utilisées pour l'analyse des éléments traces métalliques (Draghici et al., 2011).....	49
Tableau 14 : Données de biosurveillance humaine (HBM) pour les éléments métalliques proposées par la Commission allemande (mercure, cadmium, thallium) (Angerer et al., 2011).....	57
Tableau 15 : Les limites biologiques fixées par les organismes nationaux américain et allemand.....	60
Tableau 16 : Valeurs de références (95^{ème} Percentile) pour les éléments essentiels et les éléments toxiques en population Béninoise :	114

Table des matières

Introduction	1
I. PREMIERE PARTIE : État de la question.....	3
I.1. Secteur informel et économie informelle	3
I.1.1. Définition et caractéristiques du secteur informel.....	3
I.1.2. Importance et caractéristiques de l'économie informelle.....	5
I.1.2.1. Dans les pays développés	6
I.1.2.2. Dans les pays en développement	8
I.1.3. Travail décent et sécurité sociale dans l'économie informelle : enjeux sanitaires pour les pays en développement.....	10
I.1.3.1. Promotion du travail décent dans l'économie informelle	10
I.1.3.2. Protection sociale, santé et sécurité des travailleurs de l'économie informelle	13
I.1.4. Généralités sur le marché du travail et l'économie informelle au Bénin	16
I.1.4.1. La sécurité sociale pour les travailleurs au Bénin.....	19
I.1.4.2. Les branches d'activités de l'économie informelle au Bénin	21
I.1.4.3. Secteur informel et artisanat au Bénin.....	23
I.1.4.4. Cas des forgerons ferblantiers de la branche « Métaux et constructions métalliques ».....	24
I.2. Éléments traces métalliques en population humaine.....	30
I.2.1. Principaux ETM et leur toxicité	31
I.2.1.1. Sources de contamination et toxicité des éléments (Arsenic, béryllium, cadmium, chrome, plomb, mercure (Lauwerys, 2007))	32
I.2.1.2. Matrices biologiques pour le dosage des ETM	39
I.2.2. Détermination analytique des ETM.....	40
I.2.2.1. Analyse par ICP-MS (Plasma Induit Couplé à la Spectrométrie de Masse) : ..	42
I.2.2.2. Autres méthodes d'analyses des éléments traces métalliques	47
I.2.3. La surveillance des expositions professionnelles.....	49
I.2.3.1. Mesurages atmosphériques en milieu de travail (Dehon et al., 2001)	50
I.2.3.2. Biométrie	52
I.2.4. Valeurs limites utilisées pour l'évaluation des expositions	55
I.2.4.1. Les valeurs biologiques en population générale.....	55
I.2.4.2. Valeurs limites biologiques en milieu professionnel.....	56
I.2.4.2.1. Valeur limite biologique règlementaire contraignante.....	57
I.2.4.2.2. Indicateurs biologiques d'exposition et valeurs guides.....	57
I.2.4.3. Valeurs de référence des ETM, exprimées en µg/L, retrouvées dans la matrice « sang total » (littérature scientifique)	62
I.2.4.3.1. Lithium (Li) sanguin	62
I.2.4.3.2. Béryllium (Be).....	62
I.2.4.3.3. Magnésium (Mg).....	63
I.2.4.3.4. Aluminium (Al)	63
I.2.4.3.5. Vanadium (V)	64
I.2.4.3.6. Chrome (Cr)	65
I.2.4.3.7. Fer (Fe)	66
I.2.4.3.8. Manganèse (Mn)	67
I.2.4.3.9. Cobalt (Co).....	68
I.2.4.3.10. Cuivre (Cu)	69
I.2.4.3.11. Zinc (Zn).....	70
I.2.4.3.12. Arsenic (As).....	71
I.2.4.3.13. Sélénium (Se).....	72
I.2.4.3.14. Strontium (Sr)	73
I.2.4.3.15. Molybdène (Mo).....	74
I.2.4.3.16. Rhodium (Rh)	75

I.2.4.3.17. Palladium (Pd)	75
I.2.4.3.18. Cadmium (Cd)	76
I.2.4.3.19. Etain (Sn)	78
I.2.4.3.20. Antimoine (Sb).....	78
I.2.4.3.21. Baryum (Ba)	79
I.2.4.3.22. Cérium (Ce).....	79
I.2.4.3.23. Tungstène (W).....	80
I.2.4.3.24. Platine (Pt).....	80
I.2.4.3.25. Mercure (Hg)	81
I.2.4.3.26. Thallium (Tl)	81
I.2.4.3.27. Plomb (Pb)	82
I.2.4.3.28. Bismuth (Bi).....	83
I.2.4.3.29. Uranium (U).....	83
II. DEUXIEME PARTIE : Travaux de recherche.....	85
II.1. Objectifs.....	85
II.2. Site de l'étude	86
II.3. Article N° 1 : Risques professionnels, conditions de travail et état de santé des ferblantiers travaillant dans l'économie informelle à Cotonou, Bénin.....	89
II.4. Article N°2 : Évaluation des concentrations sanguines en éléments métalliques en population générale	105
II.4.1. Résumé des résultats et discussion de l'article 2.....	114
II.5. Article N° 3 : Évaluation de 20 métaux toxiques et essentiels dans le sang des ferblantiers informels, recycleurs de métaux à Cotonou (Bénin).....	116
III. Discussion générale	136
Conclusion	142
Références bibliographiques	143
Annexes	151

Context and objectives: In Benin, the "informal sector" represents almost 80% of workers with a predominance of craftsmen, followed by the modern private sector (11%) and the civil service (9%). The socio-professional situation of craftsmen is characterized by the lack of personal or collective protective equipment, exposure to physical and harmful chemical substances and a lack of social security. The main objective of this thesis was to study the impact of working conditions on the health of tinsmiths in the informal economy in Cotonou, Benin. This research also allowed us to evaluate the blood impregnation of trace elements in tinsmiths compared to the background levels of the non-occupationally exposed male population of Cotonou. This part of the study required a first survey of 70 blood donors in Cotonou, in order to propose reference values for 29 trace elements. **Method:** A cross-sectional study was carried out in Midombô on the site of the tinsmiths in the 3rd district of Cotonou in Benin. Study population: A total of 84 workshop managers out of 102 gave their agreement to participate in the study of work places and conditions (participation rate of 82.4 %). Among the 251 tinsmiths working in the 102 workshops investigated, 135 agreed to go to the "Erasmus" health center (53.8%) for free medical care. In this population, there were 31 apprentices (23.0 %) and 104 craftsmen or master craftsmen (77.0 %). **Results:** Noise levels greater than 85 decibels were observed in 58.3% of the workshops, with an average working time of 10 hours per day. This exposure can be the cause of hearing impairment (mild to severe) observed in 99, 3% of the cases. Direct exposure to metal fumes and dust (38.52 %) and the consumption of food at the workplace are the cause of metallic impregnation. For 6 trace elements, more than 20 % of the tinsmiths had blood concentrations above the reference values of the general population. These elements, classified from the lowest to the highest level of impregnation were molybdenum, copper, strontium, tin, antimony, and lead, respectively. Approximately 71% of the tinsmiths had lead levels above the 95th percentile of concentrations found in unexposed populations in Cotonou. 83% of the workers who were under 18 years of age had blood lead levels $\geq 100 \mu\text{g} / \text{L}$. Uncorrected visual acuity (> 20%) and untreated arterial hypertension (27.4 %) were detected in the participating tinsmiths. **Conclusion:** Informal workers are in a very vulnerable situation due to poor social protection and a high level of exposure to occupational risks. Given the large number of employees in the informal sector, improving the occupational health and safety of these workers should help to strengthen human capital and reduce the incidence of occupational diseases that are still poorly documented.

Keywords: Informal Work, Health and Safety, Tinsmiths, Benin, Lead, Metallic trace elements.

Résumé

Contexte et objectifs : Au Bénin, le « secteur informel » représente près de 80 % des travailleurs avec une prédominance d'acteurs dans l'artisanat, suivi par le secteur privé moderne (11 %) et la fonction publique (9 %). La situation socio-professionnelle des artisans est caractérisée par l'absence d'équipements de protection, par l'exposition à des nuisances physiques et chimiques et par l'absence de sécurité sociale. L'objectif principal de ce travail de thèse était d'étudier l'impact des conditions de travail sur la santé des forgerons-ferblantiers exerçant dans le cadre de l'économie informelle, à Cotonou au Bénin. Ce travail a permis également d'évaluer l'imprégnation sanguine en éléments traces métalliques chez les ferblantiers par comparaison avec les concentrations observées dans la population masculine de Cotonou, non exposée professionnellement. Cette partie de l'étude a nécessité la mise en place d'une première enquête en population générale, chez 70 donneurs de sang à Cotonou afin de proposer des valeurs de référence pour 29 éléments traces métalliques.

Méthode : Une étude transversale a été réalisée à Midombô sur le site des artisans ferblantiers dans le 3ème arrondissement de Cotonou au Bénin. Au total, 84 responsables d'atelier sur 102 ont donné leur accord de participation pour l'étude des postes et conditions de travail, soit un taux de participation de 82,4 %. Parmi les 251 personnes travaillant dans les 102 ateliers investigués, 135 ferblantiers ont accepté de venir au centre de santé Erasme (53,8 %) pour bénéficier d'un entretien médical gratuit. Dans cette population, 31 personnes étaient des apprentis (23,0 %) et 104 étaient des artisans ou maîtres-artisans (77,0 %). **Résultats :** Il a été observé des niveaux de bruit supérieurs à 85 décibels dans 58,3 % des ateliers, avec une durée du travail en moyenne de 10 h par jour pouvant être à l'origine des déficits auditifs (légers à sévères) observés dans 99,3% des cas. L'exposition directe aux fumées et poussières métalliques (38,52 %) et la consommation d'aliments au poste de travail seraient à l'origine d'une imprégnation métallique. Pour 6 éléments traces, plus de 20 % des ferblantiers présentaient des concentrations sanguines supérieures aux valeurs de référence de la population générale. Par ordre croissant de niveau d'imprégnation, il s'agissait du molybdène, du cuivre, du strontium, de l'étain, de l'antimoine, et du plomb. Environ 71 % des ferblantiers présentaient des plombémies supérieures au 95^{ème} percentile des concentrations retrouvées en population non exposée à Cotonou. Pour les moins de 18 ans, la prévalence des travailleurs ayant une plombémie $\geq 100 \mu\text{g/L}$ était de 83 %. Une baisse de l'acuité visuelle non corrigée (> 20 %) et une hypertension artérielle non traitée (27,4 %) ont été dépistées chez les ferblantiers participants. **Conclusion :** Les travailleurs informels sont dans une situation de grande vulnérabilité du fait d'une faible couverture en matière de protection sociale et d'un niveau élevé d'exposition aux risques professionnels. Compte tenu du grand nombre de travailleurs dans l'économie informelle, l'amélioration de la santé et de la sécurité au travail des acteurs de ce secteur, devrait permettre un renforcement du capital humain et la réduction des maladies professionnelles encore mal documentées.

Mots-clés : Travail informel, Santé et sécurité, Ferblantiers, Bénin, Plomb, Éléments traces métalliques.