Haute école d'arts appliqués Arc
Filière : Conservation – restauration
Orientation : objets scientifiques, techniques et horlogers

LE MERCURE DANS LES COLLECTIONS DU PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL : PROBLEMATIQUES DE CONSERVATION

Antonin TARCHINI

MEMOIRE REMIS LE 15 SEPTEMBRE 2006

REMERCIEMENTS

Par la présente, je tiens à remercier les personnes et institutions suivantes qui m'ont permises de mener à bien mon travail d'investigation :

- M. Christian Degrigny (chercheur) qui en qualité de mentor m'a soutenu et aidé tout au long de mon travail et m'a permis de réaliser divers contacts d'une grande utilité;

- Mme Maria da Luz Sampaio (Directrice du musée de la science et de l'industrie) pour m'avoir accepté dans ce musée et mis à disposition l'ensemble de redresseurs à vapeur de mercure ainsi que pour son soutient technique et pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ce stage. Egalement pour son amitié et sa compagnie lors des nombreux repas partagés;

- Mme Maria Manuel Branco et Mme Armandina Silva pour leur disponibilité, leurs conseils ainsi que leur agréable compagnie ;

- Mme Paula Menino Homem (professeur en conservation-restauration à l'université de Porto) pour les contacts indispensables (faculté des sciences) qu'elle ma permis de réaliser ainsi que pour ses conseilles et sa participation ;

- M. Carlos Manuel de Meio Pereira et Mme Ana Maria Teixeira Martins (professeurs à la faculté des sciences – département de chimie) pour avoir accepté de collaborer dans le cadre du travail d'investigation visant à identifier et quantifier la présence de mercure dans les poussières et l'air du musée de la science et de l'industrie ;

- Diana Luisa da Silva Santos, Miriam Franco da Anunciação, Joana Sofia Pinheiro et Aníbal Filipe Silva (élèves en chimie à la faculté des sciences de Porto) pour la préparation des échantillons pour les analyses ainsi que leur patience lors des multiples essais insatisfaisants avec l'appareillage de spectroscopie d'absorption atomique ;

- M. Antonio Pires de Matos (Ingénieur), Mme Augusta Moniz Lima (professeur assistante) et Mme Márcia Vilarigues (assistante) pour la réalisation des analyses de fluorescence X à la faculté des sciences et technologies de l'université nouvelle de Lisbonne – département de conservation – restauration

- M. J. D. Markham (Ingénieur dans le domaine de la traction électrique) pour l'échange soutenu de courrier électronique m'ayant permis d'obtenir, au début de mon travail, des informations sur la technique et les problématiques spécifiques des redresseurs à vapeur de mercure à ampoule de verre ;

- M. Jean Guy Guillot (chimiste) du centre toxicologique du Québec pour ses conseils, notamment en ce qui concerne la gestion de la problématique des poussières contaminées ;

- L'entreprise Américaine SKC® pour m'avoir gracieusement offert des badges d'échantillonnage (passive Sampler) permettant l'analyse de la concentration de vapeur de mercure dans l'air ;

- L'ONAL (Organisação National de Armamento de Lisboa) pour m'avoir gracieusement offert deux flacons de produit Ballistol ;

- Toutes les personnes qui on répondus à mes questions spécifiques un moment ou à un autre de mon travail ;

- Toutes les personnes qui de loin ou de près m'on soutenues et accompagnées.

REMERCIEMENTS **3**

RESUME **9**

ABSTRACT **10**

RESUMO **12**

1 INTRODUCTION **13**

2 LE MERCURE : SON UTILISATION ET SA TOXICITE **15**

2.1 Rappels historiques **15**

2.1.1 Découverte 15

2.1.2 Méthodes de production 16

2.1.2.1 Petites exploitations *16*
2.1.2.2 Exploitation à grande échelle *16*

2.1.3 Premières utilisations 21

2.1.3.1 Applications pratiques *21*
2.1.3.2 Des hypothèses alchimiques à la chimie moderne *22*

2.2 Propriétés **23**

2.2.1 Définition 24

2.2.2 Mercure élémentaire 24

2.2.2.1 Propriétés physiques *24*
2.2.2.2 Propriétés chimiques *26*

2.2.3 Composés du mercure et amalgame 27

2.2.3.1 Composés inorganiques *27*
2.2.3.2 Composés Organiques *30*
2.2.3.3 Amalgames *30*

2.3 Emploi du mercure dans le domaine de la technique et de l'industrie **31**

2.3.1 Instrumentation de mesure 31

2.3.1.1 Pression *32*
2.3.1.2 Température *33*
2.3.1.3 Autres instruments de mesure *34*

2.3.2 Instrumentation electrique 35

2.3.2.1 Interrupteur / contacts *35*

2.3.2.2 Piles ... *36*
2.3.2.3 Eclairage ... *36*
2.3.2.4 Redresseurs à vapeur de mercure ... *37*

2.3.3 Autres instruments utilisant du mercure ... 38

2.3.4 Procédés Industriels ... 39

2.4 Toxicité du mercure ... 39

2.4.1 Découverte et conséquences ... 39

2.4.2 Données toxicologiques ... 41

2.4.2.1 Le mercure élémentaire ... *41*
2.4.2.2 Les composés inorganiques ... *43*
2.4.2.3 Les composés organiques ... *44*

2.4.3 Méthodes de détection ... 45

2.4.3.1 Symptômes ... *45*
2.4.3.2 Analyses ... *45*

2.4.4 Autres dangers ... 47

2.5 Organes de gestion ... 47

2.5.1 Situation générale ... 47

2.5.2 Réglementations, normes, mesures ... 48

2.5.2.1 Commerce du mercure ... *48*
2.5.2.2 Instrumentation comportant du mercure ... *49*
2.5.2.3 Normes relatives à l'exposition humaine ... *51*

2.6 Les systèmes de protection ... 53

2.6.1 Prévention ... 54

2.6.1.1 Stockage ... *54*
2.6.1.2 Manipulation ... *55*
2.6.1.3 Protection personnelle ... *55*

2.6.2 Systèmes de contrôle ... 56

2.6.2.1 Méthodes de détection directes ... *56*
2.6.2.2 Méthodes de détection indirectes ... *60*

2.6.3 Gestion d'accident ... 62

3 LE MERCURE DANS LES MUSEES ... 65

3.1 Les collections ... 65

3.1.1 Types de collections – identification et évaluation des risques ... 65

3.1.1.1 Patrimoine technique et industriel ... 65
3.1.1.2 Autres types de patrimoines ... 67
3.1.1.3 Identification et évaluation des risques ... 68

3.1.2 Problématiques de conservation-restauration – gestion des risques ... 69

3.2 Déontologie et législation ... 72

3.2.1 De la necessité de conserver le mercure dans les collections ... 72

3.2.2 Application de la législation dans les musées ... 72

4 ETUDE DE CAS : REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE ... 73

4.1 Historique technique des redresseurs à vapeur de mercure ... 74

4.1.1 Définition ... 74

4.1.2 Données Historiques ... 75

4.1.3 Technique ... 77

4.1.3.1 Ampoule à mercure ... 77
4.1.3.2 Redresseurs à vapeur de mercure à cuve métallique ... 88

4.2 Les trois redresseurs « Hackbridge & Hewittic" ... 91

4.2.1 Historique de la marque ... 91

4.2.1.1 Peter Cooper Hewitt et la lampe à vapeur de mercure ... 91
4.2.1.2 Les premiers redresseurs à vapeur de mercure ... 92
4.2.1.3 Période de production ... 93

4.2.2 Contexte historique ... 93

4.2.2.1 Le service des transports collectifs de Porto ... 94
4.2.2.2 Période de fonctionnement de l'appareillage ... 94
4.2.2.3 Période d'abandon de l'appareillage ... 95
4.2.2.4 Historique du musée de la science et de l'industrie ... 96

4.2.3 Approche pratique de l'appareillage ... 98

4.2.3.1 Description technique ... 98
4.2.3.2 Identification du risque ... 101
4.2.3.3 Evaluation du risque ... 114
4.2.3.4 Gestion du risque ... 130

4.3 Approche systématique pour ce type d'appareillage ... 141

4.4 Possibilité de remise en fonctionnement pour ce type d'appareillage ... 142

5 CONCLUSION ... 144

6 BIBLIOGRAPHIE 146

6.1 Références citées 146

6.2 Références non citées 153

7 ANNEXES 155

A1 - Liste des minéraux contenant du mercure 157

A2 - Liste des piles et leur contenance en mercure 159

A3 - Fiches internationales de sécurité pour le mercure et ses principaux composés 161

A4 - Tableau des principales instances compétentes dans la gestion du mercure 175

A5 – Proposition de location pour appareil Jerome 431-X Mercury Analyser 179

A6 - Tableau représentant diverses méthodes de détection directe pour la mesure de la concentration en vapeur de mercure dans l'air 181

A7 - Protocoles pour la mesure de la concentration en vapeur de mercure dans l'air 183

A8 - Illustration de la série des ampoules Hackbridge & Hewittic, pour redresseurs à vapeur de mercure, fabriquées dans les années 1950 191

A9 - Tableau illustrant diverses liaisons employées pour le scellement des électrodes sur les ampoules en verre de redresseurs à vapeur de mercure 193

A10 - Plan de la réserve du musée de la science et de l'industrie représentant la répartition de l'appareillage lié aux redresseurs à vapeur de mercure 195

A11 - Schéma représentant la répartition des particules de mercure sur les tableaux électriques 6 et 7 des redresseurs à vapeur de mercure du musée de la science et de l'industrie 197

A12 - Liste des institutions contactées pour la réalisation d'analyses de laboratoire à Porto 199

A13 – Documentation sur les badges d'échantillonage et les spots test SKC® pour la détection de mercure 201

A14 - Informations sur le matériel employé pour la réalisation des analyses de laboratoire (spectroscopie d'absorption atomique et fluorescence X) 211

A15 - Spectres résultant des analyses de fluorescence X effectuées sur les produits d'altérations de nature blanche prélevés sur les ampoules des redresseurs 217

A16 - Protocole d'intervention pour l'extraction du mercure de l'ampoule cassée, du musée de la science et de l'industrie 221

A17 - Description d'une réaction chimique survenue lors du ramassage des poussières contaminées dans le fond de la boîte en bois comportant l'ampoule cassée 225

A18 - Panneau d'avertissement réalisé pour les redresseurs à vapeur de mercure du musée de la science et de l'industrie 229

A19 - Documentation, comportant les recommandations pour l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure, preparée pour la base de donées du musée de la science et de l'industrie 231

A20 - Fiches techniques du produit ballistol® et WD-40® 239

A21 – Lexiques : abreviations et termes techniques 253

RESUME

Le stage que j'ai pu mené au musée de la science et de l'industrie de Porto (Portugal), dans le cadre de ma formation de conservateur-restaurateur - spécialisation patrimoine technique et industriel - m'a conduit à découvrir la problématique de la conservation d'appareillages techniques renfermant de grandes quantités de substances toxiques (mercure). En effet, ce musée possède un ensemble de redresseurs à vapeur de mercure qui se présente sous la forme de plusieurs ampoules de verre de grandes dimensions possédant chacune des quantités de mercure importantes. L'état de conservation précaire de cet ensemble posait de nombreux problèmes techniques et déontologiques que je souhaitais aborder de manière la plus large possible afin de proposer une stratégie de conservation-restauration la plus adéquate.

Ce travail a nécessité de s'intéresser au préalable au matériau mercure, à sa présence dans les collections techniques et industrielles et aux questions qu'il soulève sur la sécurité des personnes exposées à sa manipulation.

Le mercure est un élément très anciennement connu. Pourtant son exploitation au niveau industriel est plus récente et est associée à son emploi massif au sein de la société. On le trouve sous différentes formes (Hg élémentaire, composés organiques et inorganiques, amalgames), chacune correspondant à des applications bien spécifiques. Les propriétés physiques uniques de l'élément mercure (état liquide à température ambiante, forte densité) le rendent indispensable dans le domaine des sciences et des appareillages techniques et scientifiques. En tant que composé avec d'autres éléments (oxygène, soufre, chlore, azote, etc.) le mercure est une composante essentielle dans le déroulement de nombreux procédés chimiques (catalyseur), mais également dans la constitution d'une variété importante de produits : pharmaceutique, médicament, armurerie, alimentation, conservateur, etc.

Si le mercure a de nombreux atouts pour l'industrie et la société en général, il est par contre extrêmement toxique à la fois pour l'homme et son environnement. Bien que la forme organique du mercure semble être la plus dangereuse, sa forme élémentaire (métallique) est loin d'être inoffensive et les vapeurs inodores, incolores et extrêmement toxiques qui s'en dégagent facilement représentent un réel risque pour les personnes confrontées au mercure. La plupart des composés inorganiques du mercure représentent également un risque de santé pou l'être humain. Généralement, le niveau d'intoxication est dépendant de plusieurs facteurs tels que le type de composé, la quantité, la voie d'absorption ainsi que la sensibilité de la personne concernée.

Les nombreuses études sur la toxicologie du mercure et de ses composés ont mené à la nécessité de développer des mesures préventives permettant de réduire l'exposition de l'être humain et de l'environnement. Ces mesures visent la réduction de l'utilisation de mercure, mais également le développement de systèmes de protection permettant de minimiser son impact dans les domaines où

il n'existe pas encore de substituts suffisamment rentables. Les efforts fournis dans ce sens varient en fonction des pays, même si l'idée de base reste l'éradication plus au moins totale du mercure au niveau planétaire.

La présence de mercure dans les musées rassemblant des objets techniques et scientifiques mais également des collections organiques traitées avec les composés du mercure représente un danger potentiel pour le personnel ainsi que le public, mais constitue également un patrimoine unique qu'il est de notre devoir de préserver. Dans le cadre de ce travail notre attention a porté essentiellement sur la problématique du mercure dans le domaine technique et industriel. La conservation de ce type d'appareillage nécessite donc le développement de stratégies spécifiques issues d'une collaboration entre les professionnels des musées et les instances impliquées dans la gestion du mercure.

Les résultats du travail effectué sur l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure du musée de la science et de l'industrie de Porto permettent de confirmer l'existence de problématiques importantes pouvant, dans certains cas, représenter des risques réels d'intoxication. Ceci est le cas pour la présence de quantités importantes de mercure sur les surfaces (poussières) de tableaux électriques ainsi que pour l'identification de mercure non contenu dans une enceinte hermétique. Ces deux cas de figure sont considérés comme des formes de contamination et ils ont donné lieu à la réalisation d'une investigation plus approfondie. La confrontation directe à cette problématique qui nécessite des méthodes de gestion adaptées requiert une approche pluridisciplinaire. En fait ce travail a nécessité à la fois les compétences de conservateur-restaurateurs, d'ingénieurs spécialisés des systèmes considérés, d'experts en pollution industrielle mais également de chimistes pour les analyses menées sur site et en laboratoire. Sur la base des données rassemblées on a pu présenter une stratégie d'intervention sur les redresseurs à vapeur de mercure qui a permis à la fois de prévenir un risque important de déversement de mercure liquide, de nettoyer du matériel visiblement contaminé et d'assurer la conservation à moyen terme d'un ensemble de systèmes stockés dans des conditions inadéquates.

ABSTRACT

The internship realized at the Museum of Science and Industry of Porto (Portugal) during my final year of studies at the HEAA-Arc (conservation-restoration - specialization in technical and industrial heritage) made me discover the conservation problems of technical artefacts containing large quantities of a toxic substance: mercury. This museum owns a group of mercury arc rectifiers composed of several large glass bulbs each one containing important quantities of mercury. The condition of these artefacts generates many technical and ethical problems that I wanted to address in order to propose an adequate conservation strategy.

To begin with, it was necessary to study the material mercury, it's presence in the technical and industrial collections and the security issues for museum staff (storage, manipulation).

Mercury is an element that has been known for a long time. It's exploitation at industrial level is more recent and represents a massive production. Mercury can be found under different forms (elementary ($Hg°$), organic (Ch_3Hg^+) and inorganic compounds (Hg^+ and Hg^{2+}), amalgams) depending on it's specific application. The unique physical properties of mercury (liquid state at ambient temperature, strong density, good electrical conductivity) make it essential in the domain of scientific and technical instrumentation. Pure or combined with other elements (oxygen, sulfur, chlorine, nitrogen, etc.), mercury is an essential compound in many chemical processes (catalyst), but also in the constitution of various products: pharmaceutical, medicine, weapons, nutrition, preservatives, etc.

Mercury has many benefits for the industry and society but it is also extremely poisonous for man and his environment. Although the organic form of mercury seems to be the most dangerous one, it's elementary (metallic) form is far from being inoffensive. The odorless, colorless and extremely toxic vapors are easely released (at ambient temperature) and represent a real risk for people exposed to them. Most of the inorganic compounds also represent a health risk for humans. Generally, the intoxication level depends on several factors such as composition, quantity, the way of absorption, as well as the sensitiveness of the contaminated person.

The study of the toxic aspects of mercury and its compounds leads to the development of preventive measures with the intention of reducing exposure to men and his environment. These measures aim at reducing the use of mercury, but also at developing protection systems to reduce it's impact in domains where no viable substitutes exist. The ultimate goal is the elimination of the use of mercury at world level. However, the application of such measures are variable according to the different countries.

The presence of mercury in museums mainly concerns technical and scientific objects but also organic collections treated with mercury compounds. Such collections are a potential danger for museum staffs, as well as for the public, but they also are a unique heritage that we have to preserve. This research project addresses the problems of mercury in technical and industrial collections and how it can be managed. It necessitates the development of specific strategies coming from a collaboration between museum professionals and institutions involved in mercury management.

The obtained results from the study of the group of mercury arc rectifiers from the Museum of Science and Industry of Porto confirmed the presence of major problems with real intoxication risks. Large quantities of mercury on the surfaces of electric boards (dusts), as well as the presence of a broken glass bulb containing huge quantities of mercury were considered as contamination forms. They led to further in depth investigations. Part of this work required the competences of conservators, specialized engineers, experts in industrial pollution but also chemists for on site and laboratory analysis. On the basis of the obtained results it was possible to develop an intervention strategy on the mercury arc rectifiers. This strategy allowed to prevent an important risk of mercury spillage, to clean visibly

contaminated equipment and surfaces and to assure the conservation of the artefacts previously stored in inadequate conditions.

RESUMO

O estágio realizado no Museu de Ciência e Indústria do Porto (Portugal), durante o último ano da nossa formação na HEAA-Arc (Conservação e Restauro - Especialização em Património Técnico e Industrial), permitiu-nos descobrir os problemas de conservação colocados por objectos que contêm grandes quantidades de uma substância particularmente tóxica – o MERCÚRIO.

Este Museu possui um grupo de rectificadores de vapor de mercúrio composto por várias âmpolas de vidro, contendo cada uma delas uma quantidade significativa deste metal. O estado de conservação destes objectos colocava vários problemas técnicos e deontológicos, os quais foram por nós estudados com o propósito de traçar uma estratégia de conservação.

Inicialmente, começámos por estudar o mercúrio, a sua presença nas colecções técnicas e industriais e as questões ligadas à segurança do pessoal do museu (manipulação, armazenamento) e do seu público.

O mercúrio é um elemento conhecido desde há muito tempo. A sua exploração a nível industrial é mais recente e absorve, na actualidade, grande parte da sua produção. O mercúrio encontra-se sob diferentes formas: elementar (Hg), orgânico (Ch3Hg+), compostos inorgânicos (Hg+ e Hg2+) e amálgamas, cada uma delas com aplicações específicas. As propriedades físicas únicas do mercúrio (estado líquido à temperatura ambiental, grande densidade, boa condutibilidade eléctrica) fazem dele um elemento essencial no domínio da instrumentação técnica e científica. Puro ou combinado com outros elementos (oxigénio, enxofre, cloro, nitrogénio, etc.), o mercúrio entra em muitos processos químicos (catalisador) e na constituição de vários produtos, nomeadamente nos sectores da medicina, da indústria farmacêutica, de armamento, nutrição, etc.

O mercúrio tem muitas vantagens para a indústria e para a sociedade em geral mas é, por outro lado, extremamente tóxico para o Homem e seu ambiente. Embora a forma orgânica do mercúrio seja a mais perigosa, a sua forma elementar (metálica) não é inofensiva. Os seus vapores incolores, inodoros e extremamente tóxicos, facilmente libertados mesmo à temperatura ambiental, representam um risco importante para todos os que a eles estão expostos. A maioria dos compostos inorgânicos representam, também, riscos de intoxicação. Geralmente, o nível de intoxicação depende de vários factores, tais como a sua composição, quantidade, meio de absorção e a sensibilidade da pessoa contaminada.

O estudo dos aspectos toxicológicos do mercúrio e dos seus compostos levaram ao desenvolvimento de medidas preventivas com a intenção de reduzir a exposição do ser humano a este metal. O

objectivo principal destas medidas foi a redução do uso do mercúrio e o desenvolvimento de um sistema de protecção que permita reduzir o seu impacto em domínios onde não existem substitutos. A aplicação de tais medidas varia de acordo com a legislação vigente nos diferentes países.

A presença de mercúrio nos museus que conservam objectos técnicos e científicos e nas coleções orgânicas, inicialmente tratadas com compostos de mercúrio, representa um perigo para o pessoal do museu e para o seu público. Contudo, estes objectos constituem em si um património raro que é necessário estudar e conservar. No âmbito deste projecto de pesquisa, a nossa atenção foi essencialmente focalizada nos problemas colocados pela presença de mercúrio nas colecções técnicas e industriais. A conservação deste tipo de património implica que se estabeleça um quadro de estratégias específicas, que devem envolver a colaboração entre os profissionais dos museus e as instituições envolvidas na gestão do mercúrio.

O estudo do conjunto de rectificadores de vapor de mercúrio do Museu de Ciência e Indústria do Porto confirmou a presença de problemas importantes, sendo de destacar os riscos de intoxicação. A identificação de uma grande quantidade de mercúrio nas superfícies dos painéis eléctricos, nas poeiras existentes, e a presença de uma âmpola de vidro partida com mercúrio no seu interior foram consideradas formas de contaminação real. Estes dois casos levaram à realização de uma investigação mais profunda. A confrontação directa com estas problemáticas, que implicam métodos de gestão próprios, requer um trabalho pluridisciplinar que envolve conservadores, engenheiros especializados, peritos em poluição industrial e químicos, que realizem análises *in situ* e em laboratório. Ao longo do nosso trabalho foram efectuados exames e análises das amostras recolhidas e, com base nos resultados obtidos, foi possivel desenvolver uma estratégia de intervenção nos rectificadores de vapor de mercúrio. Esta permitiu a limpeza dos equipamentos visivelmente contaminados, evitar o risco de derrame de mercúrio e a conservação dos objectos inicialmente armazenados em condições inadequadas.

1 INTRODUCTION

Depuis le 17e siècle et à cause de ses propriétés physiques et chimiques uniques, le mercure est utilisé pour de nombreuses applications techniques et industrielles (éclairage, instruments de mesure, appareillage à haute tension). La toxicologie de ce métal est également connue et étudiée depuis le Moyen Age, mais semble négligée tout au long de la Révolution industrielle pour ne revenir à l'ordre du jour qu'à partir de la deuxième moitié du 20e siècle. Le mercure est alors considéré comme une substance toxique et la diminution progressive de son utilisation dans le domaine technique devient une priorité.

L'évolution technologique ainsi que la nécessité de substituts au mercure et aux appareillages l'employant amènent ce matériau ainsi que le matériel technique l'utilisant à devenir un patrimoine potentiel. Logiquement, la présence d'objets contenant du mercure dans les musées techniques et

industriels engendre un risque non négligeable pour la santé de l'ensemble du personnel ainsi que du public. La toxicité du mercure est un sujet bien connu dans le secteur public et industriel et une législation plus au moins complète à ce sujet existe aujourd'hui dans de nombreux pays (Etats-Unis, Communauté Européenne). En ce qui concerne le domaine muséal, les études existantes sur le mercure portent principalement sur son utilisation antérieure en tant que pesticide, pour le traitement des objets de certaines collections. Le mercure présent dans l'appareillage technique est moins étudié mais pose de nombreuses questions à la fois techniques et éthiques. Les régulations concernant le mercure ont dû être adaptées aux problématiques posées du fait de la nécessité de maintenir sa présence au sein des collections. De nouvelles questions ont été soulevées tel que le problème du vieillissement sur le très long terme des contenants du mercure et la conservation des matériaux en contact avec ce métal. On l'aura compris, les collections techniques et industrielles comportant du mercure exigent une stratégie de conservation spécifique.

Dans le présent travail, les informations historiques, techniques et toxicologiques existantes au sujet du mercure sont d'abord rassemblées. Une réflexion est ensuite menée, afin d'identifier les problématiques plus spécifiquement liées au domaine du patrimoine technique et industriel et la manière de les gérer. Cette réflexion permet également de voir dans quelles mesures les réglementations et recommandations issues du milieu industriel et public peuvent être appliquées aux objets de ce type de collection. L'étude de cas d'un ensemble de redresseurs à vapeur de mercure (Hackbridge & Hewittic) employés pendant plus de cinquante ans par le service des transports publics de Porto (Portugal) et faisant partie des collections du musée de la science et de l'industrie permet finalement d'étudier, d'une manière plus appliquée les problèmes pratiques rencontrés dans un musée. Ce cas pratique est également l'occasion d'étudier historiquement et techniquement ce type d'appareillage qui contient généralement des quantités importantes de mercure, qui a été couramment employé pendant le 20e siècle dans divers domaines de la technique et de l'industrie et que l'on retrouve dans de nombreux musées européens et extra-européens. Le travail effectué sur cet ensemble de redresseurs à vapeur de mercure est d'abord mené sous la forme d'une investigation permettant l'identification et l'évaluation des risques que le musée de la science et de l'industrie encourt du fait du stockage actuel de cet appareillage dans ses réserves. Ceci demande un travail d'observation sur la constitution même des objets et sur leur état de conservation qui implique la réalisation de recherches sur le plan international (informations spécifiques liées au mercure) ainsi que la collaboration avec certaines instances publiques locales (musées, matériel de laboratoire). Ce travail est mené à travers une approche pluridisciplinaire, afin de traiter le sujet de la manière la plus complète possible (problématiques de contamination, détection de fuite de mercure, aspect moral, etc.). Basée sur les connaissances acquises, une stratégie de conservation (interventions pratiques, conservation préventive, recommandations) est développée pour les objets concernés. Le but de cette stratégie est d'éliminer les problèmes existants relatifs à la présence de mercure, mais également de mettre en place un plan d'action préventif permettant de réduire le risque de contamination.

2 LE MERCURE : SON UTILISATION ET SA TOXICITE

2.1 RAPPELS HISTORIQUES

L'utilisation du mercure remonte à plusieurs millénaires et est le résultat d'une longue évolution intégrant de nombreux domaines abordés par la suite. Les propriétés particulières de ce métal (aspect, état liquide à température ambiante, grande densité, toxicité[1]) lui ont rapidement permis de devenir un objet de grande fascination auquel on a trouvé de multiples applications qu'on détaillera. Le chapitre suivant rassemble les données concernant la découverte du mercure ainsi que le développement et l'évolution des méthodes de production permettant l'utilisation de ce métal à une plus grande échelle. Les applications techniques et industrielles du mercure (instrumentation, industrie chimique, etc.) étant un des principaux centres d'intérêt de ce travail, elles seront développées dans le chapitre 2.3 *Emploi du mercure dans le domaine de la technique et de l'industrie.* Ce premier chapitre ne constituant pas un historique complet et détaillé du mercure, le lecteur pourra approfondir tel ou tel aspect en consultant l'ouvrage de Goldwater J. A.[2] ainsi que celui de McAulifte C. A.[3], qui ont été les deux sources principales de notre recherche bibliographique.

2.1.1 DECOUVERTE

Les premières utilisations du mercure (terminologie employé à partir du 17e siècle[4]) restent très imprécises, mais il semble qu'on le rencontre déjà à l'époque néolithique sous forme de sulfure (HgS – cinabre – minerai principal). Des traces de cinabre qui semble avoir été employé à l'époque comme pigment rouge et/ou produit de conservation, ont été identifiées sur des ossements datant de cette période en Italie (4000 av. J.-C.) et en Espagne (3000 av. J.-C.)[5]. Plus récemment, la présence de cinabre a été décelée dans diverses tombes et sites archéologiques[6] (Inde – 3000 av. J.-C., Grèce-2000 av. J.-C., Chine – 1751-1112 av. J.-C., Egypte - 1300 av. J.-C.) et son emploi en chine pour la préparation des encres rouges (2ème millénaire av J.C.)[7] semble prouvé. Plus proche de nous encore, on trouve des traces d'utilisation du cinabre pour le tatouage des corps (prés-Incas : 200 av J.C.)[8], pour la décoration d'objets, les peintures murales ou encore la préparation d'une peinture antifouling[9] (Miltos) employée dans la Grèce ancienne pour protéger les bateaux[10]. Les premières références écrites évoquant l'utilisation de mercure métallique semblent être attribuées à plusieurs auteurs connaissant tous les procédés de base d'extraction du mercure à partir de son minerai principal

[1] DUVAL, 1968, p5

[2] GOLDWATER , 1972

[3] MCAULIFTE, 1977

[4] DUVAL, 1968, p7

[5] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p7

[6] GOLDWATER, 1972, p75, 76, 73 et 79

[7] MCAULIFTE, 1977, p11

[8] GOLDWATER, 1972, p81

[9] LES MOTS EN SOULIGNE SONT DEFINIT EN ANNEXE 21

[10] GOLDWATER ,1972, p77

(cinabre)[11] : Théophraste (4e-3e siècle av. J.-C.), Vitruve (1er siècle av. J.-C.) et Discorides (1er siècle ap. J.-C.). Ceux-ci sont repris par la suite.

2.1.2 METHODES DE PRODUCTION

2.1.2.1 Petites exploitations

Le principe de base d'extraction du mercure de son minerai est connu depuis l'Antiquité (3ème siècle av. J.-C). Théophraste semble être le premier à proposer un procédé basé sur la séparation par amalgamation : écrasement d'un mélange de cinabre et de vinaigre dans un mortier en cuivre[12]. Vitruve décrit quant à lui, dans *Naturalis Historia* (fin du 1er siècle av. J.-C.), une technique de séparation du mercure de son minerai sulfureux par chauffage[13] : chauffage (600-700°C) du minerai (cinabre) dans un four provoquant l'évaporation du mercure dont les vapeurs se condensent sur les parois de ce dernier (distillation). Les billes de mercure sont ensuite récoltées dans le fond du four et placées dans un récipient rempli d'eau afin de les recombiner. Pline l'Ancien et Discorides (1er siècle ap. J.-C.) connaissent et décrivent également ce procédé de distillation[14]. Il semblerait que le nom *Hydrargyrum* (argent liquide) soit mentionné par Pline pour du mercure distillé[15]. Aucune autre description ou amélioration n'existe concernant les procédés de production du mercure pendant les 1500 ans qui suivent et cette méthode restera le principe de base employé pour l'extraction du mercure.

2.1.2.2 Exploitation à grande échelle

Ce n'est qu'à partir du début du 16e siècle, avec le développement du procédé de traitement des minerais d'argent par amalgamation au mercure pour les mines de la Nouvelle Espagne (Mexique), que la demande concernant ce dernier métal s'accroît fortement[16]. Les exploitations minières pour l'extraction du mercure se multiplient et la production s'intensifie, ce qui pousse au développement de procédés d'extraction à grande échelle et plus performants. Ainsi, Vannucio Biringuccio (1480 – 1539) décrit dans *Pirotechnia* (1540), plusieurs infrastructures pour l'extraction du mercure qui reposent toutes sur la même méthode : la distillation[17] (fig.1a). Georgius Agricola décrit quant à lui, dans *Re Metallica (1556)*, le procédé d'extraction du mercure à ciel ouvert[18]: les morceaux de minerai sont déposés dans de petits pots en terre cuite (base ronde), dont l'ouverture est scellée avec de la mousse (végétal), positionnés à l'envers dans un pot à base plate. Le tout est placé sur un feu provoquant l'évaporation du mercure (fig.1b).

---

[11] McAulifte, 1977, p4-5

[12] McAulifte, 1977, p4

[13] McAulifte, 1977, p4

[14] Goldwater, 1972, p49

[15] Duval, 1968, p6

[16] Parsons & Percieval, 2005, p1-2

[17] Goldwater, 1972, p51-52

[18] Parsons & Percieval, 2005, p1-2

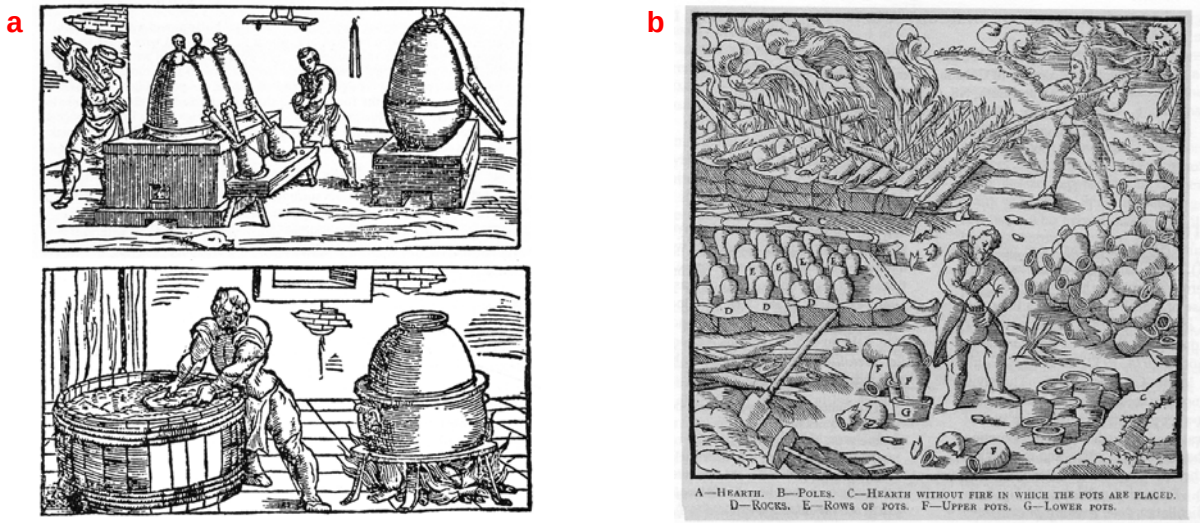


Fig.1 – Descriptions schématiques de procédés d'extractions du mercure par distillation, employés au 16e siècle : méthodes d'extraction employant des pots en terre cuite comme four et chambre de condensation, décrites par Vannucio Biringuccio dans *Pirotechnia* (1540) (**a**)[19] et méthode d'extraction à ciel ouvert décrite par Agricola dans *Re Metallica* (1556) (**b**)[20]

Les vapeurs se condensent dans la base arrondie du pot supérieur et le mercure liquide est ensuite récolté dans le pot inférieur. Agricola propose également quatre autres méthodes dans son ouvrage. Une seule de ces méthodes est réellement développée par lui-même et sera utilisée dans les mines d'Almaden (Espagne), plus grand site de production mondiale, jusqu'à la fin du 16e siècle[21]. La recherche pour l'obtention d'un meilleur rendement pour la production du mercure semble être initiée par Alvaro Alonso Barba (1569 – 1640), à travers son travail d'observation réalisé dans les mines d'argent de Pitosi (Bolivie) dans les années 1620 et 1630[22]. Barba est le premier à considérer que le coût d'un procédé chimique de production doit être pris en considération : carburant, matière première, travail, mais également usure matérielle. Les recherches de Barba semblent avoir favorisé l'apparition du premier type de four (connu sous le nom de Bustamonte) pour l'extraction du mercure, vraisemblablement développé en 1633 par le médecin Lopez Saavedra Barba des mines de mercure de Huancavelica (Pérou) et introduit dans les mines d'Almaden par Bustamonte en 1646[23]. A partir de là, deux types de fours différents sont développés : le four à cuve (Bustamonte (1646), Rodriguez (1896), Christy, Knox (1874-75), Hakner) est employé pour le minerai en morceaux et est constitué d'une cuve dont l'espace intérieur est vide (fig.2a)[24] et le four à réverbère (Huttner-Scott (1875), Germak-Spirek (1888), Léopold) qui permet de traiter le minerai préalablement broyé et est constitué

[19] PAR GOLDWATER, 1972, p51

[20] PAR AGRICOLA, 1556, p425

[21] GOLDWATER, 1972, p52

[22] MCAULIFTE, 1977, p15

[23] SCHNABEL, 1898, p256

[24] BOUCHONNET, 1911, p195, 215, 227

d'une cuve munie d'une succession de plaques inclinées sur lesquelles le minerai s'écoule durant l'opération de grillage (fig. 2b)[25].

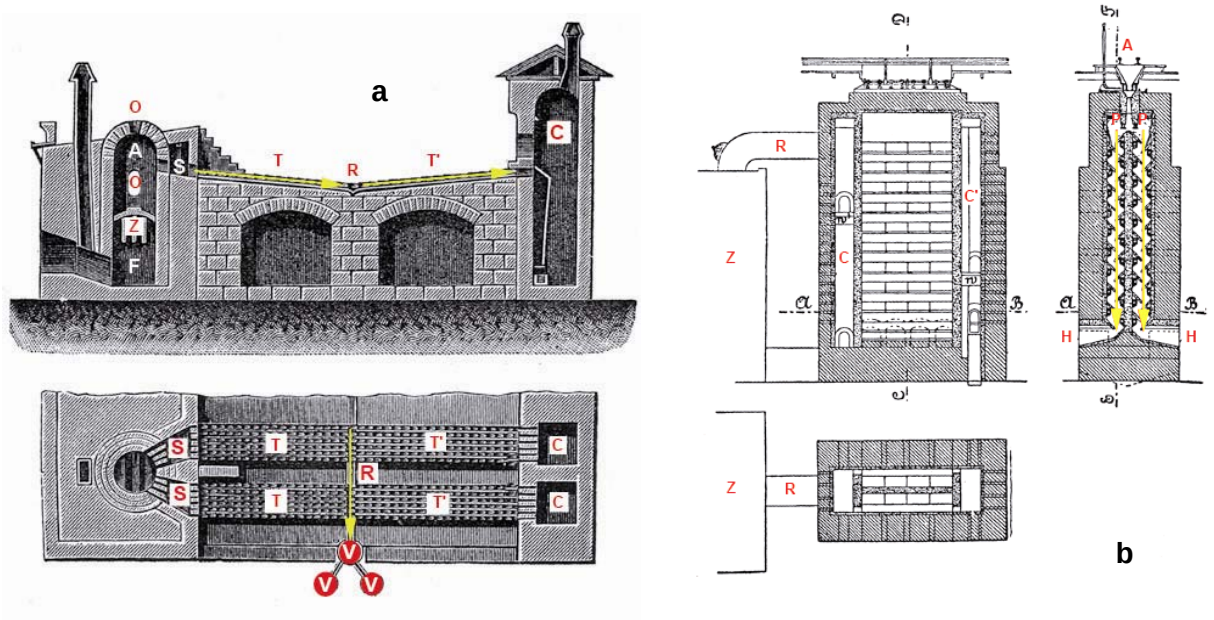


Fig.2 – Représentation schématique des deux principaux types de fours employés à partir du 17e siècle (a) et 19e siècle[26]. Four à cuve Bustamonte (**a**) : le minerai brut, chargé dans A par O est bloqué par la plaque Z qui est placée au dessus du foyer F. Les vapeurs de mercure, libérées par le chauffage du minerai, pénètrent par S dans les 12 tubulures de condensation T dont l'inclinaison permet au mercure de s'écouler jusqu'à la rigole R menant aux vases de récupération V. La chambre de condensation C permet aux vapeurs non condensées, amenées par les tubulures T', de se condenser. Four Hütner et Scott (**b**) : le minerai, préalablement broyé, est introduit dans le four par A et dégringole sur une série de plaques P inclinées à 45°. Les vapeurs de mercure produites, grâce aux hautes températures régnant dans le four, sont acheminées dans les conduits C et C', puis dans la tubulure R qui mène à la chambre de condensation Z, où le mercure sera récupéré.

Les divers fours développés et employés jusqu'à la fin du 19e siècle dans l'exploitation des mines de mercure sont décrits en détails dans l'ouvrage de Schnabel C., Traité Théorique et Pratique de Métallurgie, 1898. Dans le but d'augmenter la capacité de production et de réduire la main d'œuvre, des fours avec agitation mécanique (Herreshoff, Gould) sont ensuite mis au point dès le début de 20e siècle[27].

Jusqu'à nos jours, les procédés les plus employés pour la production du mercure reposent sur la succession de trois principales étapes :

1° Préparation du minerai : concassage et triage du minerai par lavage et flottaison. Parmi les nombreux minéraux contenant du mercure (liste en annexe 1), le cinabre (HgS) représente le principal minerai employé pour la production de ce métal[28] (fig.3). Parfois du mercure natif est associé (fig. 4).

[25] BOUCHONNET, 1911, p205, 226, 242

[26] Tiré de Schnabel, 1898, p256-257 - modifié par ©Tarchini

[27] PASCAL DIR., 1962, p442-442

[28] GOLDWATER, 1972, p32

Durant les périodes de grande demande, la cordéroite ($Hg_3S_2Cl_2$), la livingstonite ($HgSb_4S_7$) et le métacinabre (HgS) ont également été employés[29].

Fig.3 – Minerai de cinabre (HgS) [30]

Fig.4 – Sphères de mercure natif sur minerai de cinabre [31]

2° Extraction du mercure (distillation): oxydation du soufre par chauffage du minerai (grillage) en présence d'oxygène à une température comprise entre 600 et 700°C selon :

$$HgS_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow Hg_{(g)} + SO_{2(g)}$$

Le mercure est ainsi séparé par évaporation et par combinaison du soufre avec l'oxygène. On le récupère ensuite par condensation. D'autres procédés utilisant le fer ($HgS + Fe \rightarrow Hg + FeS$) ou l'oxyde de calcium ($4HgS + 4CaO \rightarrow 4Hg + 3CaS + CaSO_4$) ont également été utilisés mais leur faible rendement ont limité leur application à grande échelle[32].

3° Purification : aujourd'hui, ce procédé permettant d'éliminer les éléments indésirables (plomb (Pb), étain (Sn), zinc (Zn), bismuth (Bi)[33], etc.) présents dans le mercure extrait, se fait par distillation sous vide (Gooch, Palmaer, Jäger)[34]. Cette opération permet d'obtenir du mercure d'une pureté supérieure à 99.99%[35].

---

[29] SCOULLOS, 2001, p11

[30] WIKIPEDIA[1]

[31] LEBEAUX

[32] AYLETT, 1975, p276

[33] DUVAL, 1968, p.16

[34] BOUCHONNET, 1911, p245

[35] AYLETT, 1975, p276

La purification du mercure était auparavant effectuée selon deux méthodes :

- Purification par voie humide : lavage du mercure dans l'acide nitrique dilué (HNO_3), ce qui permettait d'éliminer les métaux plus oxydables que le mercure[36].
- Purification par voie sèche : procédé de distillation élaboré dans un appareil de laboratoire en verre spécialement développé pour cet effet.

De nombreux gisements de mercure ont été exploités, à plus au moins grande échelle, au niveau mondial. Parmi ces derniers, la mine d'Almaden (Espagne) est de loin la plus importante, autant au niveau de la quantité de mercure extraite que de la durée de l'exploitation. Exploitée à partir d'environ 430 av. J.-C., elle constitue la principale source de commerce du mercure à partir du 11e siècle[37] jusqu'à nos jours. La mine d'Idrija (Yougoslavie) en activité à partir de la fin du 15e siècle[38] représente également une source importante de mercure. Le site de Monte Amiata (Italie) est probablement déjà utilisé pendant la Préhistoire (source du cinabre trouvé sur des ossements du Néolithique), mais son exploitation ne semble prendre de l'importance qu'à partir du début du 20e siècle[39]. Les trois pays cités ci-dessus représentent, sans aucun doute, les trois plus grands sites de production de mercure en Europe, ainsi qu'au niveau mondial[40]. Comme autres gisements importants de mercure, on trouve la mine de Huancavelica au Pérou (1563), New Almaden au Etats-Unis (1834) et Nititowka en Ukraine (1879)[41]. La Chine et le Mexique représentent également d'importants producteurs de mercure[42]. Aujourd'hui, la plupart des mines de mercure sont fermées (tendance à réduire l'utilisation) et ce métal est extrait en tant que sous-produit découlant de l'exploitation des mines d'autres métaux (or, argent, plomb, cuivre, zinc) dont les minerais contiennent également du mercure[43]. En 2002 la production totale (primaire et recyclage) de mercure est de 2016 tonnes (Almaden 37%, Kyrgygstan 30%, Algérie 15% et Chine 12%)[44]. La figure 5 (p20) illustre les variations de la production mondiale de mercure entre le 16e et le 20e siècle. Ce graphique démontre que la plus grande production de mercure représente la période de la 2ème guerre mondiale ainsi que celle postérieure à la Révolution industrielle.

Aujourd'hui, la présence de mercure sur le marché mondial provient essentiellement de : l'exploitation minière du mercure, l'exploitation (sous-produit) minière et raffinage d'autres métaux (or, zinc) ou minéraux, des stocks privés ou publiques ainsi que du recyclage du mercure récupéré à partir de produits usagés et de déchets industriels[45].

---

[36] AYLETT, 1975, p276

[37] GOLDWATER, 1972, p61

[38] GOLDWATER, 1972, p42

[39] GOLDWATER, 1972, p37-38

[40] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005

[41] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005

[42] GOLDWATER, 1972, p39

[43] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005[2]

[44] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p5

[45] UNEP CHEMICALS, 2002

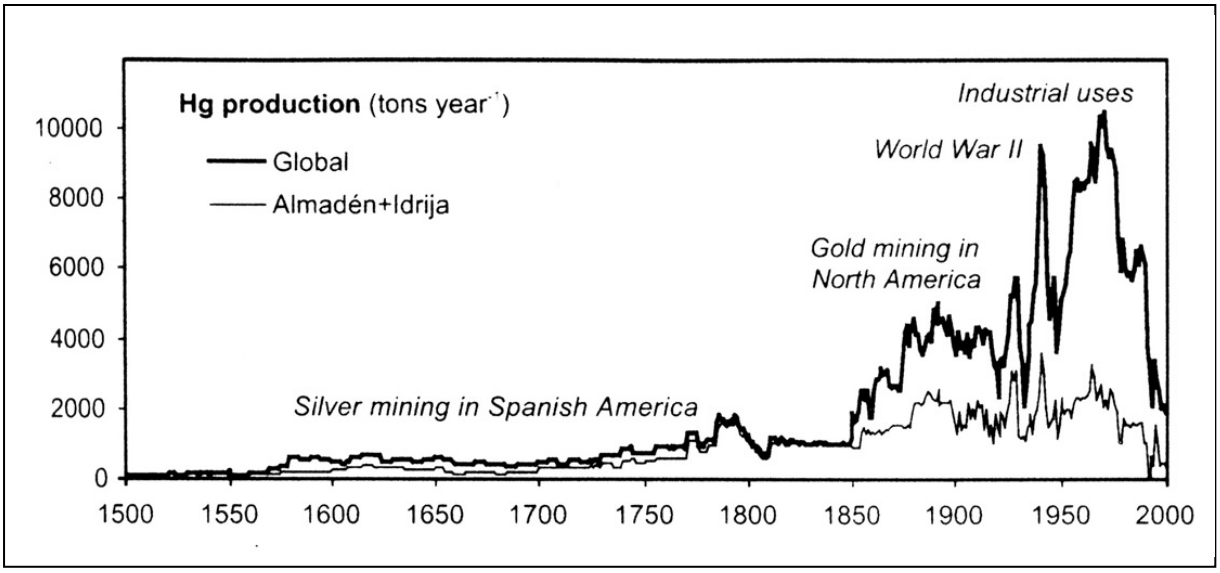


Fig.5 – Représentation graphique de la production de mercure entre l'année 1500 et l'année 2000, au niveau mondial ainsi que pour les deux plus grands sites de production au monde (Almaden et Idrija)[46]

2.1.3 PREMIERES UTILISATIONS

2.1.3.1 Applications pratiques

La capacité d'amalgamation du mercure avec d'autres métaux est certainement une des premières propriétés employées. Parmi les applications pratiques du mercure, on trouve la purification de l'argent puis de l'or (Pline l'Ancien (23 – 79 ap. J.-C.) décrit une méthode de purification de l'or et de dorure pour cuivre et argent employant du mercure) ainsi que la fabrication de miroir par dépôt d'un amalgame d'étain et de mercure sur une plaque de bronze (Chine – 2e Siècle av J.-C.)[47]. Toujours dans l'Antiquité, le fait que le mercure se présente à l'état liquide à température ambiante et possède une grande densité permet son emploi dans le fonctionnement de clepsydres et de sphères armillaires (chine – 2e Siècle av. J.-C.)[48]. Durant le Moyen Age, le mercure est également employé dans divers objets mécaniques, dont les plus réputés semblent être l'horloge à mercure (1275) d'Alphonse X (Roi des Romains) dont une description complète est présentée dans le « Libro del Relogio dell Argen Vivo » (Livre de l'horloge du vif argent)[49]. Cet ouvrage mentionne également l'utilisation du mercure comme source de mouvement pour un astrolabe. Cependant, ces pièces restent des objets de curiosité et il faut attendre l'invention du thermomètre (~ 1610) et du baromètre (1644)[50] pour que le mercure joue un rôle prédominant dans le domaine de l'instrumentation scientifique. A partir de cette période, ce métal est de plus en plus employé et connaît de nombreuses applications scientifiques et

[46] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p3

[47] GOLDWATER, 1972, p80

[48] GOLDWATER, 1972, p81

[49] GOLDWATER, 1972, p87

[50] GOLDWATER, 1972, p108,-110

industrielles qui seront détaillées dans le chapitre 2.3 *Emploi du mercure dans le domaine de la technique et de l'industrie.*

2.1.3.2 Des hypothèses alchimiques à la chimie moderne

Au-delà de ses applications pratiques, le mercure joue un rôle important dans le développement de nombreuses théories scientifiques et philosophiques, ceci depuis l'Antiquité. En alchimie, art ésotérique qui plonge ses racines dans la plus lointaine Antiquité de la plupart des continents et est considéré comme l'ancêtre de la chimie moderne, le mercure représente un des trois principes métaphysiques (soufre, sel, mercure) [51] et est considéré comme le composant primaire de tous les métaux[52]. Le mercure semble être aussi l'élément clef dans la quête de la Pierre Philosophale, quête antique autant spirituelle que pratique, qui consistait à trouver la recette de l'obtention de l'or à partir de métaux communs[53]. Le mercure fait également partie des éléments employés dans la recherche pour la préparation de l'Elixir de la vie (accès à l'immortalité), autre quête alchimique que l'on retrouve en Chine dans l'Antiquité[54].

La théorie alchimique des trois éléments – tout corps est composé de mercure, soufre et sel - largement adoptée par Paracelse (1493 – 1541) [55] et ses successeurs représente un des derniers principes énoncés. Durant le 17e siècle, le mercure est encore considéré d'un point de vue mystique par les théoriciens chimistes et personne n'est capable de le définir réellement. Un des premiers événements clef de la nouvelle théorie de l'élément semble être lancé par Johann Baptista van Helmont (1579 – 1644) qui, refusant le concept de Paracelse, démontre le principe de l'indestructibilité de la matière[56]. Van Helmont porte à ébullition une solution de mercure et d'acide sulfurique qui forme un précipité à partir duquel le mercure originel peut être quantitativement récupéré. Le début de la Révolution menant aux fondements de la chimie moderne a lieu avec Robert Boyle (1627 – 1691) qui publie, dans *Sceptical Chymist* (1661) sa propre définition de l'« élément »: « Those primary and simple bodies of which the mixed ones are said to be composed, and into which they are ultimately resolved » [57] . Boyle semble utiliser les propriétés du mercure pour confirmer ses arguments. Les premiers principes de la chimie moderne sont réellement établis avec la découverte de l'oxygène à la fin du 18e siècle, découverte qui débute avec plusieurs recherches réalisées sur l'étude des gaz. Ainsi, Stephen Hales (1677 – 1761) développe une technique lui permettant de mesurer la pression d'un gaz[58] : un petit pois fermenté est placé sur la surface d'une certaine quantité de mercure placé dans une bouteille à l'intérieur de laquelle est introduit et scellé (par le goulot) l'extrémité d'un tube de verre. Les gaz produits par la fermentation du petit pois provoquent ainsi l'ascension du mercure dans

[51] Wikipedia[2]

[52] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p5

[53] MCAULIFTE, 1977, p7

[54] MCAULIFTE, 1977, p11-12

[55] GOLDWATER, 1972, p95

[56] GOLDWATER, 1972, p95

[57] GOLDWATER, 1972, p95

[58] GOLDWATER, 1972, p100

le tube en verre. Ce principe de base est ensuite employé par Henry Cavendish (1731 – 1810), puis par Gay-Lussac (1778 – 1850) pour leurs études sur les gaz[59]. Dans sa découverte de l'oxygène en 1774, Joseph Priestley (1733 – 1804) utilise ce principe pour récolter l'oxygène qu'il parvient à produire à travers le chauffage d'oxyde de mercure rouge[60]. Le nom « oxygène » est finalement donné par Antoine Laurent Lavoisier (1745 – 1794) qui reprend l'expérience de Priestley et la publie dans *Easter Memoire,* en 1775[61]. Lavoisier serait également le premier à désigner le mercure en tant qu'élément. L'histoire de l'oxygène n'est qu'un des exemples de recherches où le mercure joue un rôle prédominant.

On retrouve également le mercure, principalement sous sa forme métallique, dans les recherches effectuées dans le domaine de la physique et de l'électricité. Généralement, le métal est employé tel quel ou comme élément principal dans divers instruments de laboratoire. Vitruvius (1er siècle av. J.-C.) compare le comportement d'une pierre de 100 pounds (environ 45 kg) et d'un morceau d'or (1,3 g) sur un bain de mercure et énonce ainsi le premier principe sur la gravité des corps[62]. Robert Boyle (1627 – 1691) emploie le mercure pour effectuer les mesures relatives à la pression nécessaires à l'énoncé de sa loi[63]. Robert Hooke's (1635 – 1703) emploie le mercure dans ses activités expérimentales relatives à la capillarité, la réflexion et la réfraction de la lumière[64] et Joseph Black (1728 – 1799) dans ses expériences menant au concept de la chaleur latente et de la chaleur spécifique[65]. Thomas Graham (1805 – 1869) utilise un instrument pneumatique contenant du mercure ainsi qu'une pompe à mercure pour énoncer sa loi sur l'équivalence mécanique de la chaleur[66]. James Prescott Joule (1818 – 1889) étudie la chaleur développée par la friction du mercure pour définir la notion de température critique[67]. Dans le domaine plus spécifique des recherches élaborées sur l'électricité, le mercure est également utilisé pour ses bonnes propriétés conductrices. Ohm emploie ainsi des contacts électriques au mercure pour l'appareillage permettant d'énoncer sa loi[68]. Ceci ne représente que quelques exemples illustrant le rôle que joue le mercure dans la recherche scientifique et le développement de nombreux principes et de nombreuses lois.

2.2 PROPRIETES

Ce chapitre a pour objectif l'étude des propriétés physiques et chimiques du mercure ainsi que de ses composés. Ces données sont nécessaires à la compréhension des problématiques pratiques de conservation – restauration et de toxicologie abordées par la suite.

[59] GOLDWATER, 1972 p100
[60] MCAULIFTE, 1977, p19
[61] MCAULIFTE, 1977, p19
[62] GOLDWATER, 1972, p78
[63] GOLDWATER, 1972, p96
[64] GOLDWATER, 1972, p97
[65] GOLDWATER, 1972, p100
[66] GOLDWATER, 1972, p105
[67] GOLDWATER, 1972, p123
[68] GOLDWATER, 1972, p124

2.2.1 DEFINITION

L'élément mercure, de symbole Hg, est un métal et appartient à la 12ème période du tableau périodique des éléments. Il est également rattaché à la catégorie des métaux lourds, dont l'usage est de plus en plus réglementé à cause de leur faculté a s'accumuler dans notre environnement et leurs effets toxiques sur la santé humaine (principalement le système nerveux). Le mercure fait partie des trois métaux à être liquide à température ambiante avec le Césium (Cs) et le Gallium (Ga)[69], mais est le seul à se trouver dans cet état de la matière au point de congélation[70]. Ce métal est généralement désigné par le mot « mercure » en français, « mercury » en anglais, ou « Quiksilber » en allemand. D'autres désignations sont plus rarement employées : métal liquide (liquid metal), vif argent (quik sylver), argent liquide (liquid sylver), hydrargyre (dérivé du Latin *hydrargyrum*, racine du symbole Hg). Le mercure peut être présent sous trois formes différentes, selon qu'il se trouve seul ou combiné avec d'autres éléments :

- Le mercure élémentaire : forme métallique du mercure, à l'état liquide à température ambiante, d'aspect argenté et dont la surface réfléchit comme un miroir.
- Les composés du mercure : composés résultant de la combinaison du mercure élémentaire avec d'autres éléments (carbone, oxygène, soufre, chlore, etc.).
- Les amalgames : alliages métalliques résultant de la combinaison directe du mercure avec d'autres métaux.

2.2.2 MERCURE ELEMENTAIRE

2.2.2.1 Propriétés physiques

Une des principales caractéristiques physiques du mercure est son bas point de fusion (-38,87°C)[71], ce qui lui donne la particularité d'être le seul métal à l'état liquide à 0°C[72]. Sa masse volumique élevée (13.534 g/cm^3 à 25°C)[73] en fait un matériau difficilement manipulable même pour de faibles quantités. A titre d'exemple, cinq litres de mercure pèsent un peu moins de 70 kg. Le mercure est également le liquide qui comporte la tension superficielle la plus élevée (0.487 N/m)[74], soit environ sept fois plus que celle de l'eau. Cette particularité donne au mercure la capacité de ne pas mouiller les surfaces avec lesquelles il entre en contact et de se diviser en billes de plus ou moins petites dimensions (parfois microscopiques) lorsqu'il est renversé ou étalé (fig.6). En effet, l'angle de raccord d'une goutte de mercure avec le verre étant de 41°, cette dernière se comporte pratiquement comme une sphère (angle de raccord = 45°), mais de nature déformable et divisible, puisque qu'elle se trouve à l'état liquide[75].

---

[69] WERNER MEYER AG

[70] BIDSTRUP 1964, p2

[71] RISHER, 2003, p5

[72] RISHER, 2003, p5

[73] RISHER, 2003, p5

[74] DUVAL, 1968, p28 - 29

[75] DUVAL, 1968, p28

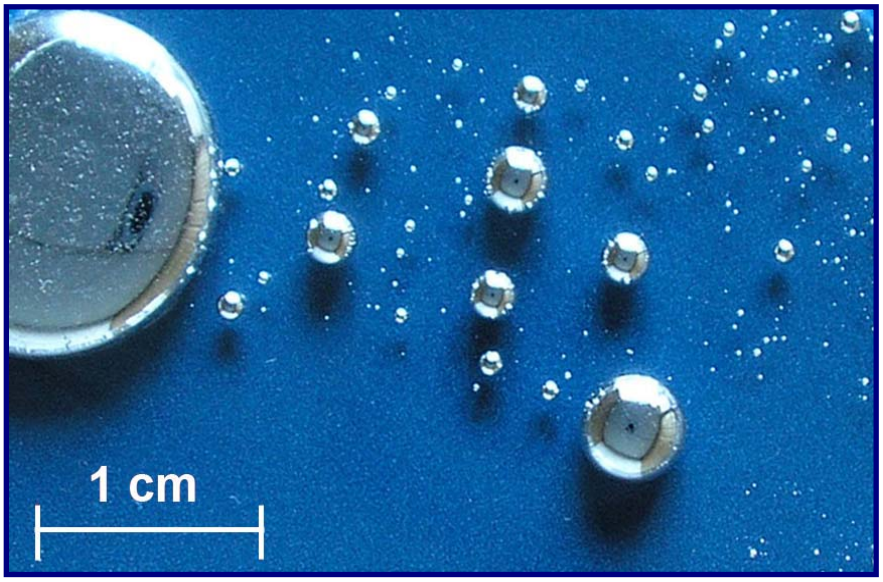


Fig.6 - Gouttes de mercure de dimensions variables étalées sur une surface en verre [76]

Le mercure comporte également la particularité de produire des vapeurs inodores et incolores, même à une température de -40°C[77]. Sa tension de vapeur (0.3 Pa à 25°C)[78], relativement faible pour un liquide mais plutôt élevée pour un métal, démontre que sa vaporisation est plutôt lente à température ambiante. En comparaison, l'eau possède une tension de vapeur de 2337 Pa. Cependant, la vitesse de vaporisation du mercure est considérée comme extrêmement rapide en comparaison avec d'autres métaux. La tendance à la vaporisation augmente avec la température : à 40°C, la valeur de la tension de vapeur du mercure est de 0.81 Pa, soit environ trois fois plus élevée qu'à 25°C[79]. La vitesse de vaporisation du mercure pour une température de 20°C est de 7 μg par cm^2 de mercure par heure[80]. Plus la surface de mercure est grande, plus la quantité évaporée est importante. La division du mercure métallique en petites gouttelettes contribue fortement à l'augmentation de la surface exposée. Par exemple, 1 ml de mercure réparti en billes de 10 μm représente une surface de 0.6 m^2 [81]. Les concentrations de valeurs saturantes pour les vapeurs de mercure, c'est-à-dire la quantité maximum de vapeur de mercure que peut contenir un espace défini, augmentent également avec la température : 2.17 mg/m^3 (0°C), 13.18 mg/m^3 (20°C), 29.46 mg/m^3 (30°C) et 62.44 mg/m^3 (40°C)[82]. Dans la pratique, pour autant que le mercure ne soit pas remué, il se recouvre d'une fine couche d'oxyde qui le protège, mais qui a également la faculté de limiter sa vaporisation[83]. La valeur de la

[76] © TARCHINI

[77] BOUCHONNET, 1911, p249

[78] RISHER, 2003, p5

[79] DUVAL, 1968, p29

[80] INTERNET[1]

[81] INTERNET[2]

[82] INRS, 2003, p8

[83] INTERNET[3]

densité de vapeur du mercure (6,39[84]) démontre que les vapeurs formées ont une forte tendance à se maintenir près du sol. En effet, cette caractéristique est attribuée à toute valeur de densité de vapeur supérieur à celle de l'air (1)[85], employée comme référence. Il semblerait que les vapeurs de mercure aient la capacité de se diffuser très vite (entre autres au travers de plusieurs centimètres d'épaisseur de bois)[86]. Lorsque le mercure est recouvert d'une couche d'eau, un équilibre s'établit entre le mercure non dissous, le mercure en solution et la phase vapeur de mercure :

$$Hg_{(liq)} \leftrightarrow Hg_{(diss)} \leftrightarrow Hg_{(vapeur)}$$ [87]

Le degré de pureté du mercure élémentaire peut sensiblement varier, généralement entre 99.9 et 99.99999 %, selon l'application pour laquelle il a été produit. Cette particularité influence certaines caractéristiques physiques du mercure. Par exemple, la présence de plomb et de zinc ralentit son évaporation, alors que la présence de platine l'accélère[88]. Le comportement du mercure sur une surface est également modifié en présence d'impuretés (poussière, etc.) : il ne coule plus en gouttes rondes mais en gouttes allongées. On dit qu'il fait la queue[89].

2.2.2.2 Propriétés chimiques

Le mercure élémentaire possède une structure atomique hexagonale au dessus de son point de fusion (jusqu'à 250 °C), alors que dans sa phase solide (en dessous de -37.5 °C) il prend la structure rhomboédrique. Les nombres d'oxydation du mercure sont +1 et +2 et les ions formés identifiés comme Hg^{+} (mercureux) et Hg^{2+} (mercurique). L'élément Hg peut être considéré comme chimiquement stable, dans la mesure où il ne s'altère pratiquement pas dans des conditions environnementales normales. La plupart des gaz pur (gaz rares, H_2) et oxydés (SO_2, SO_3, N_2O, NO, CO_2 et CO) n'ont aucun effet sur le mercure[90]. L'oxygène (O_2), l'ozone (O_3), le peroxyde d'azote (NO_2) et le sulfure d'hydrogène (H_2S) ont un effet plus au moins important sur le mercure qui mène à la formation de divers composés décrits dans le chapitre suivant (2.2.3). La solubilité du mercure dans l'eau étant très faible (0.056 mg/l à 25°C[91]), ils n'interagissent pratiquement pas l'un avec l'autre (réaction qui augmente pourtant avec la température). Le mercure peut être, par contre, dissous par l'eau oxygénée[92]. Certains solvants organiques tels que l'hexane (2,7 mg/l à 40°C), le benzène (2.0 mg/l à 20°C), le dioxane (7 mg/l à 20°C) et le méthanol (3.6 mg/l à 63°C) possèdent un pouvoir de dissolution plus important sur le mercure[93]. D'autres études ont été effectuées sur la dissolution du

[84] RISHER, 2003, p45

[85] CSST, 2002, p7

[86] BOUCHONNET, 1911, p249

[87] PASCAL DIR., 1962, p509

[88] BOUCHONNET, 1911, p250

[89] DUVAL, 1968, p16

[90] AYLETT, 1975, p281

[91] RISHER, 2003, p5

[92] PASCAL DIR., 1962, p544-545

[93] PASCAL DIR., 1962. p510

mercure dans des solvants organiques (hydrocarbures, hydrocarbures aromatiques, alcools)[94]. En ce qui concerne l'action des acides sur le mercure, les acides nitrique, chlorhydrique, sulfurique, brohydrique, iodhydrique et azotique réagissent facilement avec formation des sels respectifs (nitrate, chlorure, etc.)[95]. Les gaz d'ammoniac ne réagissent pas à sec avec le mercure, mais en présence d'eau, il peuvent mener à la formation d'un produit explosif $(Hg_2N)O(NH_3)_x$[96]. Le mercure élémentaire possède la faculté de réagir, sans conditions spéciales (température ordinaire), avec les métaux alcalins (1ère période du tableau périodique des éléments) ainsi que certains métaux. Les produits de ces réactions sont communément appelés amalgames et sont étudiés dans le chapitre 2.2.3.

2.2.3 COMPOSES DU MERCURE ET AMALGAME

Les composés du mercure peuvent être séparés en deux groupes selon qu'ils se trouvent liés à des éléments inorganiques (oxygène, soufre, chlore, etc.) – composés inorganiques - ou organiques (carbone) – composés organiques. Le mercure possède également la faculté de se lier à un certain nombre de métaux pour former des composés appelés amalgames. Le chapitre suivant se limite à l'étude des principaux composés inorganiques du mercure (formation dans des conditions atmosphériques normales) ainsi que ses possibilités de liaisons avec les métaux. Les principes de base de la formation des composés organiques du mercure sont également abordés.

2.2.3.1 Composés inorganiques

Il existe deux types de composés inorganiques : les composés donnant lieu à des ions Hg^+ :

$$Hg^+ + 2e^- \leftrightarrow Hg \text{ - } E° = 0.79\ 0V/SHE$$

et les composés donnant lieu à des ions Hg^{2+} :

$$Hg^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Hg \text{ - } E° = 0.85\ 0V/SHE$$

La plupart des composés inorganiques du mercure nécessitent des réactions chimiques ou électrochimiques artificielles pour leur formation. Dans des conditions atmosphériques normales on trouve habituellement des oxydes, des sulfures, chlorures, fluorures, iodures ainsi que des nitrites et nitrates de mercure.

En présence d'oxygène (O_2), le mercure se recouvre d'une fine couche d'oxyde mercurique (HgO) (réaction accélérée en présence des rayons ultraviolets) qui le protège et empêche la réaction de se poursuivre[97]. De l'oxyde mercureux (Hg_2O) peut se former en présence d'oxygène (O_2) et d'eau (H_2O)

[94] BRUSSET H., p31

[95] BOUCHONNET, 1911, p254

[96] BRUSSET H., 1977, p90

[97] BOUCHONNET, 1911, p253

sous la forme de vapeur[98]. L'action de l'ozone sur le mercure est également responsable de la formation rapide d'oxyde mercurique :

$$O_3 + Hg \rightarrow HgO + O_2$$ [99]

La couleur jaune ou rouge de l'oxyde mercurique dépend directement de la taille des cristaux qui sont de 2 μm pour la variété rouge et de 20 μm pour la variété jaune[100]. L'oxyde mercureux est une poudre noire qui se transforme rapidement à la lumière en oxyde mercurique et mercure[101]. C'est également un oxydant puissant qui réagit violemment lorsqu'il est mélangé avec des agents réducteurs (phosphore, sulfure, magnésium) ou avec les peroxydes et l'éthanol[102].

Le mercure réagit facilement avec le soufre (S) à l'état solide (vapeurs absorbées par le soufre en présence de lumière), mais également à l'état gazeux (sulfure d'hydrogène - H_2S) pour donner du sulfure mercurique (HgS) [103]. L'action de l'acide sulfurique (H_2SO_4) sur le mercure est responsable de la formation d'une couche de sulfure mercureux (réaction proportionnelle à la concentration de l'acide) ; ce sel se décompose, au dessus de 0°C en sulfure mercurique et mercure[104]. Le sulfure mercurique peut exister sous la forme rouge (cinabre) ou noire (métacinabre). La forme rouge est considérée comme stable à température ambiante, alors que la forme noire nécessite de la chaleur (410 °C) pour sa formation[105]. Le sulfure mercurique est réduit à l'état de mercure sous l'action de l'hydrogène ($HgS + H_2 \rightarrow H_2S + Hg$) et oxydé en sulfate mercurique (masse blanche, cristalline et hygroscopique composée de lamelles d'un blanc argent groupée en étoile) par l'action de l'ozone ($HgS + O_3 \rightarrow SO_3 + Hg$ - réactions lentes à température ambiante) [106]. En présence d'eau, le zinc et le cuivre s'unissent au sulfure mercurique et provoquent la réduction d'ion Hg^{2+} en mercure élémentaire (Hg). Le sulfure mercurique est dissout à température ambiante par l'eau régale[107].

Le mercure se combine facilement avec les halogènes (17ème période du tableau périodique des éléments) tels que le chlore, le fluore et l'iode, à température ambiante[108]. Ces réactions donnent lieux à du chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) accompagné de chlorure mercurique ($HgCl_2$), du fluorure mercureux (Hg_2F_2) et du iodure mercureux (Hg_2I_2). L'action de l'acide chlorhydrique sur le mercure est

[98] BOUCHONNET, 1911, p253
[99] DUVAL, 1968, p40
[100] DUVAL, 1968, p79
[101] BOUCHONNET, 1911., p301
[102] RISHER, 2003, p44
[103] DUVAL, 1968, p40
[104] PASCAL DIR., 1962, p547-548 et 778
[105] PASCAL DIR., 1962, p780
[106] PASCAL DIR., 1962, p784
[107] PASCAL DIR., 1962, p785
[108] BOUCHONNET, 1911, p252-253

responsable de la formation d'une couche de chlorure mercureux en surface (réaction proportionnelle à la concentration de l'acide). Les réactions en présence d'oxygène sont les suivantes :

$$2Hg + 2HCl + O_2 \rightarrow Hg_2Cl_2 + H_2O_2$$

et

$$2Hg + 2HCl + H_2O_2 \rightarrow Hg_2Cl_2 + 2H_2O$$ [109]

Le chlorure mercureux est une masse transparente, incolore et cristalline qui est soluble dans l'ammoniac. Le chlorure mercurique est une masse blanche compacte, translucide, cristalline et friable qui noircit lorsqu'elle est exposée à la lumière. Le zinc, le cadmium, le nickel, le fer, le plomb et le cuivre provoquent la précipitation du mercure de $HgCl_2$[110]. Le fluorure mercureux est soluble dans l'eau et réagit avec l'ammoniac pour former des composés ammoniaqués et du mercure :

$$Hg_2F_2 + 2NH_3 \rightarrow NH_2HgF + Hg + NH_4F$$ [111]

L'iodure mercureux pur se présente sous la forme de paillettes jaunes, mais il se décompose spontanément en mercure et iodure mercurique (HgI_2) à la température ambiante :

$$Hg_2I_2 \rightarrow Hg + HgI_2 \text{ (réaction accélérée par la lumière)}$$ [112]

A température ambiante, l'iodure mercurique se présente sous la forme d'octaèdres ou de lamelles rouge écarlate et est davantage soluble dans les solvants organiques que dans l'eau[113].

L'action du peroxyde d'azote (NO_2) sur le mercure est rapide et mène à la formation de nitrites ($Hg_2(NO_2)_2$) et nitrates mercureux ($Hg_2(NO_3)_2$)[114]. En plus de ces deux derniers composés, l'acide nitrique permet, lorsqu'il est mis en contact du mercure, la formation de nitrite mercurique ($Hg(NO_2)_2$)[115]. Les nitrites se trouvent sous la forme de cristaux jaunes, alors que les nitrates sont caractérisés par des cristaux incolores.
Le nitrite mercureux se décompose facilement en présence d'eau chaude en nitrite mercurique et mercure :

$$Hg_2(NO_2)_2 + H_2O \rightarrow Hg(NO_2)_2 + Hg.$$

[109] PASCAL DIR., 1962, p548
[110] BOUCHONNET, 1911, p274
[111] PASCAL DIR., 1962, p560
[112] PASCAL DIR., 1962, p583
[113] PASCAL DIR., 1962, p684
[114] DUVAL, 1968, p44
[115] PASCAL DIR., 1962, p584

Le nitrate mercureux réagit facilement avec l'ammoniac[116].

Il existe de nombreux composés du mercure dont la formation dépend de procédés artificiels plus au moins complexes. Parmi ces derniers, le fulminate de mercure ($Hg(ONC)_2$) possède des propriétés qui en fond un composé unique utilisé dans le domaine des explosifs. Le fulminate de mercure est une poudre gris-blanchâtre insoluble dans l'eau obtenue en combinant une solution de nitrate mercurique ($Hg(NO)_3$) avec de l'éthanol (C_2H_5OH). C'est un explosif puissant très sensible aux chocs[117].

2.2.3.2 Composés Organiques

Les composés organiques du mercure sont principalement issus de liaisons covalentes entre le mercure (sous sa forme Hg^{2+} = valence II) et le carbone. Ce processus est communément appelé « mercuration » et consiste en la substitution de l'hydrogène par le mercure dans un radical organique[118]. Il existe trois principaux types de composés organomercuriels, selon la nature du radical organique R : composés alkylmercuriels (R = groupe aliphatique), composés arylmercuriels (R = cycle benzénique) et composés alkoxyalkylmercuriels (R = fonction alcool (éther) + groupement alkyl ou aryl) [119]. Le composé organique du mercure le plus présent (nature) et le plus étudié en terme de toxicologie environnementale est communément appelé methylmercure. En terme scientifique, le methylmercure n'est pas un composé en soit, mais une partie des composés du methylmercure (ion positif CH_3Hg^+). Ce cation se trouve généralement associé soit à un anion unique (Cl^- = CH_3HgCl), soit à une grande molécule (protéine, par exemple)[120]. La formation des composés de methylmercure est naturellement issue de processus bactériologiques permettant la méthylation du mercure à partir de sa forme ionique (Hg^{2+}). Ce processus (methylation non enzymatique) semble se dérouler en présence de composés de methylcobalamine, résultant de la synthèse bactériologique, de bactérie et champignons aérobiques ou encore de matériaux fulminiques et humiques (composés de l'humus)[121]. La formation de dérivés avec le radical CH_3 (composés organiques methylé) est favorisée par la grande masse atomique du mercure[122]. Cette transformation est également facilitée par un pH acide et la présence de chlore et de soufre.

2.2.3.3 Amalgames

L'amalgame est le résultat d'une réaction entre le mercure et certains métaux. Généralement, cette liaison se fait par union directe des deux métaux (température ambiante), mais certaines réactions nécessitent des conditions spécifiques. Les alliages (amalgames) obtenus peuvent n'être que de simples solutions liquides ou solides du métal dans le mercure ou contenir des composés

---

[116] PASCAL DIR., 1962, p819-827

[117] WIKIPEDIA[3]

[118] DUVAL, 1968, p111

[119] INRS, 2003, p10

[120] INTERNET[4]

[121] KIMBERLY HUBER, 1977, p65

[122] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005[2]

intermétalliques de formule bien définie[123]. La plupart des métaux alcalins et alcalino-terreux s'amalgament par simple contact avec le mercure. La solubilité des métaux dans le mercure est variable. Pour les métaux à faible pouvoir d'amalgamation elle est comprise entre 4 x 10^{-7} (chrome) à 0.003 (aluminium). Certains métaux possèdent un pouvoir de dissolution plus élevé qui leur permettent de s'amalgamer facilement avec le mercure dans des conditions atmosphériques normales. Ceci est le cas (dans l'ordre décroissant) pour l'indium (56.5), le thallium (42.8), le cadmium (4.92), le césium (4.34), le zinc (2.15), le rubidium (1.54), le bismuth (1.4), le plomb et le gallium (1.3), le potassium (0.80), le sodium (0.68), l'étain (0.62), le magnésium (0.24), le baryum (0.33), le calcium (0.30), l'or (0.13), le lithium (0.09), l'argent (0.042) et le thallium (0.015)[124]. Les valeurs ci-dessus sont exprimées en pourcentage de masse (gramme pour cent grammes de mélange) et pour des températures comprises entre 18 et 20°C. Des études plus spécifiques existent concernant l'action du mercure sur divers métaux et alliages (titane, plomb, étain, fer cobalt, nickel, aciers, laitons, aluminium, etc.)[125].

2.3 EMPLOI DU MERCURE DANS LE DOMAINE DE LA TECHNIQUE ET DE L'INDUSTRIE

Suite à l'utilisation massive du mercure, principalement pendant la période comprise entre la moitié du 19e siècle et la fin du 20e siècle, ce métal s'est retrouvé être le composé principal de nombreux instruments et appareillages du domaine de la technique, mais également l'élément de base de nombreux procédés chimiques dans le domaine de l'industrie. En ce qui concerne l'instrumentation, le mercure est généralement employé sous sa forme élémentaire (liquide et/ou vapeur), alors que l'industrie chimique emploie essentiellement le mercure sous forme de composés. Un même instrument ayant pu être employé dans des branches professionnelles très variées, il est difficile de faire une classification par domaine d'application (industrie, médecine, science, etc.). Néanmoins, certaines publications telle que le « Draft Wisconsin Mercury Source Book» publié par the U.S. EPA (Environmental protection Agency) et the Wisconsin Department of Natural Resources, donnent ce type de classification. Les diverses applications seront ici exposées selon les principales caractéristiques du mercure employées. La plupart des instruments entrent dans deux grandes catégories : l'instrumentation de mesure ainsi que le matériel électrique. Les instruments qui ne rentrent pas dans ces deux catégories seront également mentionnés dans ce chapitre.

2.3.1 INSTRUMENTATION DE MESURE

Le mercure est employé dans de nombreux instruments de mesure dont les domaines principaux sont la mesure de la pression et de la température. Ces deux paramètres sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la météorologie, la médecine ou encore divers procédés industriels.

[123] PASCAL DIR., 1962, p510

[124] PASCAL DIR., 1962, p511

[125] BRUSSET H., 1977, p94

2.3.1.1 Pression

Le mercure est employé ici du fait de sa grande densité - le déplacement de l'eau dans un tube en verre, sous l'influence de faibles variations de pression, est beaucoup trop important - ainsi que de son état liquide à température ambiante.

Le baromètre, nom donné par Robert Boyle (1627 – 1691)[126], pour son instrument permettant de mesurer la pression atmosphérique a été employé massivement à partir du 19e siècle. A l'origine cet instrument était principalement utilisé dans le domaine scientifique, puis son emploi s'est généralisé dans le domaine public [127]. Il existe diverses sortes de baromètres (à siphon, ordinaire, à cuvette, etc.) mais tous reposent sur le même principe : la hauteur d'une colonne de mercure d'environ 76 cm (placé dans un tube en verre ouvert d'un côté) varie en fonction de la pression atmosphérique. La première démonstration du principe du baromètre (appelé à ce moment là baroscope) est réalisée en 1644 par Evangelista Toricelli (1608 – 1647) qui reprend les travaux de son prédécesseur : Galileo Galilée (1564 - 1642). Blaise Pascal (1623 – 1662) est le premier à noter que la pression varie avec l'altitude et René Descartes (1596-1650) applique une échelle à l'instrument (qui prend alors le nom de baromètre)[128]. Le premier baromètre à cadran est mis au point en 1663 par l'astronome anglais Robert Hooke (1635-1703)[129]. Un important perfectionnement est réalisé en 1672, vraisemblablement par le physicien hollandais Christian Huygens (1629 – 1695), qui consiste à placer un liquide non volatil de plus faible densité à la base de la colonne de mercure, au niveau de l'ouverture du tube en verre. Ceci permet entre autre, de réduire la volatilisation du mercure et d'empêcher l'oxydation de sa surface, en contact avec l'air dans un instrument traditionnel[130]. Par la suite, le développement de nombreux types de baromètres permet une utilisation massive de cet instrument dans le domaine domestique, mais également plus scientifique tel que la météorologie, l'étude de laboratoire (école), etc. Un baromètre contient généralement une quantité de mercure comprise entre 300 et 600 grammes de mercure, mais certains instruments de collection peuvent contenir jusqu'à 6 kilogrammes[131].

Le manomètre est un instrument qui fonctionne sur le même principe que celui décrit précédemment, mais est employé pour la mesure de la pression d'un gaz autre que la pression atmosphérique. La pression est également mesurée en fonction de la variation de la hauteur d'une colonne de mercure dans un tube en verre, mais l'extrémité du tube habituellement exposée à la pression atmosphérique est ici branchée au volume de gaz dont on souhaite mesurer la pression[132]. Il existe de nombreux types de manomètres qui équipent généralement toute installation impliquant l'utilisation d'un gaz ou

---

[126] WIKIPEDIA[4]

[127] WIKIPEDIA[4]

[128] GOLDWATER, 1972, p109

[129] WIKIPEDIA[4]

[130] WIKIPEDIA[4]

[131] Environnement Canada, 2002[2]

[132] ENVIRONNEMENT CANADA, 2002[1]

liquide contraint dont la pression doit être surveillée. Un manomètre contient généralement une quantité de mercure comprise entre 100 et 500 grammes, voir plus[133].

Le sphygmomanomètre est un manomètre servant à mesurer la pression artérielle. L'extrémité du tube en verre gradué contenant le mercure est ici branchée à un tuyau, lui-même relié à une collerette vésicale qui entoure le bras du patient et que l'on gonfle d'air. La pression artérielle peut directement être lue sur le tube en verre gradué. L'instrument est mis au point en 1896 par un médecin italien nommé Scipione Riva Rocci (1863 – 1936)[134], mais ce n'est qu'en 1905 que Nicolai Korotkoff (1874-1920), parvient, en ajoutant l'utilisation d'un stéthoscope, à réaliser une mesure assez précise pour diagnostiquer une hypertension[135]. Cet instrument est uniquement employé dans le domaine médical et contient généralement une quantité de mercure variant entre 20 et 60 grammes[136].

2.3.1.2 Température

Le mercure est employé pour la mesure de la température en raison de son grand coefficient de dilatation thermique ou plus précisément sa grande capacité à se dilater et à se contracter en fonction des fluctuations de température ainsi que de son état liquide à température ambiante.

On trouve le thermomètre dans de nombreux domaines (publique, médical, scientifique, industriel, météorologique, etc.). Généralement, cet instrument est constitué d'une tige en verre graduée partiellement remplie de mercure. Une variation de température provoque la descente (contraction) ou la montée (expansion) de la colonne de mercure et est directement lisible en superposant le haut de cette dernière (référence) avec la graduation de l'instrument. L'origine du thermomètre débute avec l'invention du thermoscope, probablement développé en 1592 par Galileo Galilée (1564 - 1642), instrument permettant de démontrer l'expansion d'air chauffé, par le déplacement d'eau[137]. Sur la base de cet instrument, Galilée (ou peut-être Sanctorius (1561 – 1636), Robert Fludd (1574 – 1637) ou Cornelius Drebbel (1572 – 1634)) inventent, en 1610, le thermomètre en ajoutant une échelle de mesure[138]. Le premier thermomètre à bulle fermée est fabriqué aux environs de 1640 par le Grand Duc Ferdinand II de Toscane (1610 – 1670), mais le liquide employé pour l'instrument est l'alcool[139]. Ce n'est qu'a la fin du 17e siècle, après de nombreuses années d'étude sur les divers liquides employés (eau, alcool, mercure, huile de lin) que le mercure est retenu. Le thermomètre devient potentiellement intéressant dès le moment ou les échelles de mesure connues aujourd'hui sous les noms de Fahrenheit (1730) et Celcius (1742) sont développées[140]. Finalement, c'est l'adoption du système métrique et tout particulièrement la nouvelle (1794) définition officielle du degré (commission

[133] ENVIRONNEMENT CANADA, 2002[1]

[134] GOLDWATER, 1972, p118

[135] WIKIPEDIA[5]

[136] Environnement Canada, 2002[2]

[137] GOLDWATER, 1972, p110

[138] GOLDWATER, 1972, p110

[139] GOLDWATER, 1972, p111

[140] GOLDWATER, 1972, p112

des poids et mesures) - «le degré thermométrique sera la centième partie de la distance entre le terme de la glace et celui de l'eau bouillante » - qui permettra au thermomètre de devenir un instrument de la vie de tous les jours[141]. Divers thermomètres à mercure sont développés par la suite, en fonction des applications. Les thermomètres médicaux (mesure de la température du corps humain) que l'on retrouve couramment dans les hôpitaux, mais également dans les foyers, sont constitués d'un tube en verre muni d'un petit réservoir fin et allongé à la base et contiennent généralement entre 0.5 et 3 grammes de mercure[142]. Le thermomètre de laboratoire est constitué d'une longue tige en verre munie d'un réservoir en forme d'ampoule à son extrémité et contient une quantité moyenne de 5 grammes de mercure[143]. Le thermomètre industriel est constitué d'une sonde, submergée dans le milieu à contrôler, reliée à l'élément thermométrique. On retrouve ce type de thermomètre dans la plupart des procédés industriels nécessitant un contrôle de la température : salle des machines, systèmes de tuyauterie, chaudières, systèmes de ventilation et de climatisation, etc. La masse moyenne de mercure utilisée dans un thermomètre industriel est de 5 grammes[144]. Il existe un autre type de thermomètre appelé pyromètre, employé pour la mesure de hautes températures dans les sites industriels (fonderie) et le contrôle de température des gaz d'échappement de grands moteurs. Ce type d'instrument contient généralement entre 5 et 10 grammes de mercure[145].

2.3.1.3 Autres instruments de mesure

Certains instruments de mesure, utilisés pour la détermination de la valeur d'autres paramètres que la pression et la température contiennent également une certaine quantité de mercure. Les débitmètres, employés pour mesurer le débit d'un gaz ou d'un liquide, peuvent contenir jusqu'à 5 kilogrammes de mercure[146]. Ces instruments sont employés dans de nombreuses applications industrielles telles que les usines de traitement des eaux usées ou les centrales électriques. Le psychromètre est un type d'hygromètre (instrument mesurant l'humidité dans l'air) constitué de deux thermomètres (un à base sèche, l'autre à base humide) et d'une échelle de conversion permettant de calculer l'humidité relative en fonction des valeurs mesurées. Le psychromètre n'est pas un instrument couramment employé, mais peut se trouver présent dans tout lieu de travail nécessitant un contrôle des conditions climatiques et atmosphériques. Cet instrument contient généralement entre 3 à 7 grammes de mercure[147]. L'hydromètre est un instrument qui ressemble à un thermomètre de laboratoire utilisé pour mesurer la gravité spécifique et la densité d'un liquide. Il contient généralement entre 0.002 et 1 gramme de mercure et est employé dans les laboratoires, les industries pétrolière et laitière ainsi que la production d'alcool[148]. Deux sortes d'instruments contenant du mercure (« mercury-motor ampere-hour meters » et « DC mercury-motor watthour meters »), développé à la fin du 19e et début du 20e

[141] Wikipedia[6]

[142] Environnement Canada, 2002[2]

[143] Environnement Canada, 2002[2]

[144] Environnement Canada, 2002[2]

[145] Environnement Canada, 2002[2]

[146] Environnement Canada, 2002[2]

[147] Environnement Canada, 2002[2]

[148] Environnement Canada, 2002[2]

siècle, semblent avoir été employés pour mesurer le débit du courant électrique[149]. Le mercure entre également dans de nombreuses techniques analytiques. Par exemple, la polarographie (J. Heyrovsky – 1922) est une méthode d'analyse physico-chimique qui emploie comme composant principal, une électrode à goutte de mercure (capillaire alimenté par une colonne de mercure)[150]. La polarographie est particulièrement adaptée à la détermination quantitative des traces et ses applications sont nombreuses: contrôle du degré de pollution des eaux, contrôle de la qualité des produits finis ou des matières premières dans l'industrie pharmaceutique ou cosmétique, détermination quantitative de certains constituants d'alliages dans le domaine de la métallurgie, analyses toxicologiques, etc[151]. Certains appareils automatiques d'analyse de laboratoire comportent également du mercure (Hitachi Chem Analyzer, Lead analyzer electrode (ESA model 3010B), Sequential Multi-Channel Autoanalyzer (SMCA) AU 2000).

2.3.2 INSTRUMENTATION ELECTRIQUE

Les propriétés conductrices du mercure tout comme son état liquide à température ambiante font de lui un métal utilisable dans le domaine de l'électricité et de l'électronique. On le trouve généralement dans quatre principaux domaines : interruption du passage du courant électrique, source de courant électrique, éclairage et redressement du courant électrique.

2.3.2.1 Interrupteur / contacts

L'interrupteur à mercure est généralement constitué d'une petite ampoule en verre allongée, partiellement remplie de mercure, dont les deux extrémités comportent des contacts reliés au circuit électrique. Dans une certaine position (ouvert), le mercure établit la liaison entre les deux contacts et le courant peut circuler, alors que dans l'autre (fermé), le mercure s'accumule dans un des côtés de l'ampoule et le courant ne peut plus passer. Les interrupteurs à mercure sont généralement employés pour permettre ou empêcher le débit d'électricité en fonction de sa position, de la température ou de la pression[152]. Le premier type est connu sous le nom d'interrupteur à bascule. Généralement, on le trouve dans des applications mécaniques dont le mouvement implique l'activation et la désactivation d'un composant électrique (interrupteurs muraux silencieux, lumières dans les automobiles, machines industrielles, ordinateurs et téléphones portables, etc.)[153]. Un interrupteur à bascule contient habituellement entre 0.4 et 71 grammes de mercure[154]. L'utilisation de ce type de composant pour la commande de pompe de forage, de fosses septiques ou de pompe de cales est appelé interrupteur flotteur. Le mercure peut être directement présent dans le flotteur ou sous forme de boîtier de commande (interrupteur à bascule) relié au bras comportant le flotteur. Ce type d'interrupteur comporte entre 1 et 15 grammes de mercure[155]. Les thermocontacts (thermostat) sont des

[149] GOLDWATER, 1972, p124

[150] Internet[5]

[151] Internet[5]

[152] Environnement Canada, 2002[2]

[153] U.S. EPA , 1977

[154] Environnement Canada, 2002[2]

[155] Environnement Canada, 2002[2]

composants qui permettent la commande d'une application électrique en fonction du changement de température. En général, ceux-ci sont constitués d'un détecteur de température (bande bimétallique) couplé à un interrupteur à bascule et contiennent environ 3 à 6 grammes de mercure[156]. Ces interrupteurs sont présents dans de nombreuses applications telles que : chaudières, fours, échangeurs de chaleur, stérilisateurs, équipement de réfrigération et de ventilation, systèmes d'alarme et distributeurs automatiques[157]. L'application de l'interrupteur à mercure permettant le réglage de la pression est appelé pressostat. Cet instrument est composé d'un détecteur de pression (membrane + piston) couplé à un interrupteur à bascule. Le pressostat est employé dans les dispositifs nécessitant un contrôle automatique de la pression tels que les systèmes de chauffage de ventilation et de climatisation, les pompes à incendie, les épurateurs, les machines outils et l'industrie automobile (système de freinage anti-blocage)[158]. Un pressostat peut contenir entre 1 et 20 grammes de mercure. Le relais est un composant contenant du mercure, permettant d'ouvrir et de fermer automatiquement une partie d'un circuit électrique, que l'on retrouve fréquemment dans des applications commerciales et industrielles. Il existe de petits relais, appelés relais mouillés à anche qui sont employés pour des dispositifs électroniques de basse tension (ordinateur, machines de bureau, système de commande, machines outils et équipement de laboratoire) et contiennent environ 1 gramme de mercure[159]. Les relais de plus grandes dimensions contiennent jusqu'à 150 grammes de mercure et sont employés dans des dispositifs à haute tension tels que les appareils d'éclairage et de chauffage[160].

2.3.2.2 Piles

Il existe diverses sortes de piles qui contiennent du mercure sous forme d'oxyde de mercure (HgO), d'amalgame zinc-mercure (Zn-Hg), de chlorure mercurique ($HgCl_2$) et chlorure mercureux (Hg_2Cl_2)[161]. Généralement, ces composants contiennent de très faibles quantités de mercure (5 à 25 mg) qui se trouvent emprisonnées dans une enveloppe solide qui constitue la structure métallique de la pile. Les divers types de piles ainsi que la quantité de mercure qu'elles contiennent sont répertoriés dans l'annexe 2, document tiré du « Draft Wisconsin Mercury SourceBook » "

2.3.2.3 Eclairage

Mis à part la lampe à incandescence (ampoule à filament), la plupart des systèmes d'éclairage développés à partir du début du 20e siècle emploient le mercure comme source luminescente (ionisation). Généralement, le principe consiste à faire passer un courant électrique (entre deux électrodes) au travers d'un milieu gazeux constitué la plupart du temps de vapeurs de mercure et d'argon (tube fluorescent)[162]. Le développement d'une lampe à vapeur de mercure commercialisable remonte aux travaux de Peter Copper Hewitt qui obtient sont premier brevet en 1900[163]. Ces

[156] U.S. EPA , 1977

[157] Environnement Canada, 2002[2]

[158] Environnement Canada, 2002[2]

[159] ENVIRONNEMENT CANADA, 2002[1]

[160] ENVIRONNEMENT CANADA, 2002[1]

[161] U.S. EPA & WISCONSIN DEPT. OF NATURAL RESOURCES

[162] WIKIPEDIA[7]

[163] BERTHIER, 1908, p205-207

premières lampes étaient simplement constituées d'un tube en quartz hermétique (sous-vide) contenant une certaine quantité de mercure et comportant une électrode à chaque extrémité (voir chap. 4.2.1.1). C'est en combinant ce principe à l'invention du tube au néon de couleur – tube à décharge recouvert d'un revêtement fluorescent – par George Claude (1870 – 1960), au début du 20e siècle, que naît le principe d'éclairage connu aujourd'hui sous le nom de « tube fluorescent » ou plus communément « néon »[164]. A partir des années 1930, les tubes fluorescents fonctionnent via deux processus simultanés : ionisation d'un mélange d'argon et de vapeur de mercure à basse pression sous l'effet d'un courant électrique (lumière produite dans la gamme des ultraviolets) et convertissement de ce rayonnement en lumière visible par un mélange binaire ou ternaire de poudre fluorescente (adapté en fonction de la couleur désirée) appliqué à la surface du tube[165]. Ce principe est valable pour tout tube fluorescent employé jusqu'à nos jours et les seules modifications apportées consistent en l'amélioration du rendement et certaines adaptations pratiques (géométrie). Ce type de lampe est largement utilisé dans le domaine privé, public et industriel jusqu'à nos jours. Certains systèmes d'éclairage, fonctionnant sous haute tension, ont été développés pour des applications nécessitant un éclairage puissant tel que l'éclairage des voies publiques, des industries, des parcs de stationnement, des fermes, etc. La lampe à vapeur de mercure à haute intensité, inventée en 1860 (Way) trouve ses premières applications à partir de 1906 dans le domaine de la médecine et de la physique (lampe en quartz)[166]. A partir de 1936, l'application de ce type de lampe s'étant à d'autres domaines (éclairage industriel et routier) et la plupart des grands fabricants de lampe (General Electric, Siemens, Osram, Philips, etc.) les proposeront à la vente[167]. Les lampes à vapeur de mercure sont constituées d'un tube à décharge en quartz munis d'électrodes, rempli d'argon et d'une goutte de mercure, enfermé dans une ampoule remplie d'azote. L'amélioration de ce type de lampe amène au développement de la lampe aux halogénures métalliques qui est largement commercialisée à partir de 1965 et que l'on retrouve dans d'autres applications tel que l'éclairage commercial et sportif[168]. Les quantités de mercure correspondant au type de lampe sont répertoriées dans certaines références [169].

2.3.2.4 Redresseurs à vapeur de mercure

Le mercure est employé comme cathode liquide dans une série d'appareils connus sous le nom de redresseurs à vapeur de mercure ou mutateurs (instrument étudié dans le détail dans le cadre de ce travail). Ce dernier est constitué d'une grande ampoule en verre ou cuve métallique à travers laquelle traverse, par le biais d'un arc électrique, un courant. Ces appareils contiennent généralement des quantités de mercure comprises entre 1 et 60 kg (dépend de la puissance) qui se trouve dans la base de l'ampoule ou de la cuve métallique (cathode) [170]. Les redresseurs ou mutateurs à vapeur de

[164] WIKIPEDIA[7]

[165] WIKIPEDIA[7]

[166] WIKIPEDIA[7]

[167] WIKIPEDIA[7]

[168] WIKIPEDIA[7]

[169] U.S. EPA , 1977

[170] AZEVEDO, 1950, p2

mercure sont employés pour la transformation du courant alternatif en courant continu dans divers domaines tels que les transports électriques, certains procédés électrochimiques (production de l'aluminium) et d'autres applications mineures tel que la recharge de batterie, la projection cinématographique et la télécommunication.

2.3.3 AUTRES INSTRUMENTS UTILISANT DU MERCURE

Le détecteur de flamme est employé dans certains appareils fonctionnant au gaz naturel tel que les fours, les fourneaux et les sécheuses ainsi que dans les installations de détection automatique d'incendie (activation des installations d'extincteurs et d'alarme)[171]. Ce composant est constitué d'une ampoule métallique remplie de mercure branchée à un tube mince (cuivre) dont l'extrémité est directement branchée à la vanne de débit gazeux. Sous l'action ou non de la chaleur de la flamme, le mercure se dilate ou se contracte pour ouvrir ou fermer cette vanne. Les détecteurs de flamme contiennent environ 1 gramme de mercure[172]. Dans le domaine de la médecine, le mercure est employé dans le dilatateur œsophagien, instrument utilisé pour dilater l'œsophage d'un patient lors de certaines interventions. Cet instrument se présente sous la forme d'un long tube qui peut contenir plus de 1000 grammes de mercure[173]. La sonde gastrique (sonde de Blakemore et de Cantor), employée dans le même domaine, utilise la grande densité du mercure pour guider l'appareil dans le tractus gastro-intestinal. Cette dernière est constituée d'un long tube, contenant jusqu'à 1000 grammes de mercure, fixé à une poire[174]. La trompe à mercure, inventée par Hermann Johann Sprengel (1834-1906) vers 1865, est un instrument (arrangement complexe de tubulures en verre) qui utilise le mouvement du mercure dans le but de créer une dépression permettant de faire le vide dans un objet donné. Ce type de pompe à vide a été beaucoup employé dans le milieu industriel (lampe à incandescence) et médical (dialyse sanguine) mais également dans le domaine de la recherche (laboratoire). Le mercure se trouve dans certaines applications liées au domaine de l'optique tel que les phares, les télescopes et la microscopie électronique. Dans les phares, le mercure est employé en quantité importante (environ 30 litres) en tant que base flottante pour soutenir le système optique (alignement précis avec l'horizon)[175]. Certains télescopes de grande précision emploient des miroirs liquides qui consistent en une cuve solide de forme paraboloïdale, en rotation selon un axe vertical, dans laquelle est disposée une couche mince de mercure qui prend elle-même la forme d'un film parabolique épousant le profil de la cuve[176]. Ce genre de télescope est peu courant ; on en trouve actuellement un d'un diamètre de 6 m au Canada (The large zenithal telescope) et il semblerait que d'autres projets soit en cour d'élaboration au Chili[177]. D'autres appareils et instruments employés à titre scientifique, expérimental et démonstratif ont été développés tout au long de l'histoire des sciences et des techniques. La spirale de Roget, employée pour démontrer l'électromagnétisme, la

[171] Environnement Canada, 2002[2]

[172] Environnement Canada, 2002[2]

[173] Environnement Canada, 2002[2]

[174] Environnement Canada, 2002[2]

[175] SCOULLOS, 2001, p413

[176] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005

[177] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005

roue de Barlow's, pour la démonstration du principe des premiers moteurs électriques et générateur ainsi que le dynamomètre de Siemen's sont quelques exemples de ce genre d'appareillage[178].

2.3.4 PROCEDES INDUSTRIELS

Mis à part les instruments cités précédemment et employés dans la plupart des domaines industriels, certains procédés de fabrication impliquent la présence et l'utilisation de quantités importantes de mercure. Les industries fabricantes d'instrument et matériel contenant du mercure ainsi que les industries de recyclage de ce genre de matériel sont bien évidemment les premières concernées. Certaines industries utilisent le mercure élémentaire comme composant essentiel dans leurs procédés chimiques (extraction et purification de l'or et de l'argent, dorure, miroiterie). Aujourd'hui, le procédé le plus répandu reste celui de la production du chlore et de la soude caustique, dans lequel le mercure joue le rôle de cathode. C'est un processus électrolytique nommé Castner-Kelner (développé en 1892 par Hamilton Y. Castner et Karl Kellner) qui consiste à faire passer un courant électrique dans une cellule close contenant du chlorure de sodium. Du chlore gazeux (Cl_2) est dégagé de l'anode en titane, alors que le sodium est amalgamé au mercure. Cet amalgame est ensuite décomposé avec de l'eau déminéralisée pour former de l'hydrogène et de la soude caustique[179]. On trouve également le mercure sous forme de composés dans de nombreux procédés chimiques ou produits spécifiques. Ceux-ci sont, par exemple, employés dans le domaine des catalyseurs ($HgCl_2$, $HgBr_2$, HgI_2, HgO, HgS, $HgSeO_3$, $HGSO_4$, $HGNO_3$), stabilisants (HgS), fongicides ($HgBr_2$), explosifs (HgO, $Hg(ONC)_2$,), emulsions photographiques ($HgBr_2$, HgO, HgSe, $HGNO_3$), pigments (HgS), composants électroniques (HgSe, HgO, HgTe), énergies nucléaires (HgO) et antiseptiques (cyanure de mercure et chlorure de mercure)[180]. L'ouvrage de Brusset H. donne de nombreuses informations sur les divers usages des composés du mercure[181].

2.4 TOXICITE DU MERCURE

2.4.1 DECOUVERTE ET CONSEQUENCES

La toxicité du mercure semble être connue depuis l'Antiquité (élément employé comme drogue par Hippocrates 400 ap. J.-C.) [182], mais les premières études sur les méfaits de ce métal sur la santé humaine en tant qu'application industrielle ne sont effectuées qu'à partir du 15e et 16e siècle. Ces premières recherches sont essentiellement réalisées dans le domaine de l'exploitation minière, dans lequel les ouvriers (esclaves et criminels romains) mourraient par milliers (espérance de vie de 3 ans)[183]. Ainsi, divers auteurs se penchent sur la question de la toxicité du mercure et publient leurs résultats : Ellenberg Ulrich – *Von den Grifftingen Besen Temmpffen von Rauchen der Metal* (1473),

[178] BARCLAY, 2001, p23-25

[179] HOUTMEYERS, 2004, p2.2-1 à 2.2-4

[180] SCOULLOS, 2001, p12

[181] BRUSSET H., 1977, p117-242

[182] BIDSTRUP 1964, p1

[183] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p1

Georgius Agricola – *De Re Metallica* (1556), Paracelsus – *Von der Bergsucht und anderen Bergfrankkeiten* (1533 – 1534) et Jean Fernel – *De Lue Venera* (1579)[184] [185]. Les études effectuées sur le mercure par Ramazzini – *The morbis artificum diatriba* (1700) semblent être particulièrement intéressantes, car cet auteur est reconnu comme étant le père de la médecine industrielle[186]. A cette époque et pendant les siècles à venir, les actions prises pour éviter l'exposition humaine aux méfaits du mercure sont tributaires du développement des méthodes d'extraction et de fabrication et aucune législation ne semble exister à ce sujet. Les cas d'intoxication sont donc fréquents et touchent de nombreux domaines de l'industrie (extraction minière, affinage de l'or et de l'argent, manufacture d'instruments de mesure, manufacture du chapeau (feutrage, voir ci-dessous) etc.), mais également de la science (travail de laboratoire). Il semblerait d'ailleurs qu'Isaac Newton (1643 - 1727) soit décédé suite aux expositions répétées aux vapeurs de mercure, métal qu'il utilise fréquemment durant ses recherches[187]. Ce n'est que durant la première moitié du 20e siècle que les premières restrictions légales sont prises. Ainsi, en 1941, le procédé de feutrage employant du nitrate de mercure, utilisé dans l'industrie du chapeau et responsable de nombreux cas d'intoxication et de mort (sujet largement étudié), est interdit aux Etats-Unis par The US Public Health Service[188]. Ce sont deux catastrophes majeures dues à l'utilisation de composés de mercure extrêmement toxiques qui marqueront la prise de mesures prévenant l'exposition à la toxicité de ce métal. En 1950, une intoxication provoquée par le déversement important de mercure (industrie) dans la baie de Minamata (Japon), provoque l'accumulation d'un composé organique extrêmement dangereux (méthylmercure – CH_3Hg^+) dans la chaîne alimentaire (poisson) et cause la mort d'environ 1200 personnes sur plus de 15 ans.[189]. Vingt ans plus tard (1971-73), l'intoxication au méthylmercure d'une population iraquienne, suite à l'ingestion de pain ayant été produit avec de la céréale traitée à l'aide d'un fongicide contenant du mercure, provoque l'hospitalisation de plus de 6000 personnes et environ 400 décès[190]. Suite à ce dernier incident, des mesures concernant la désignation de ce métal et son utilisation sont prises. A partir de 1971, le mercure est considéré comme polluant, puis comme substance toxique (1973) par l'EPA (Environment Protection Agency) aux Etats-Unis. Durant ces années, plusieurs restrictions sont prises par l'EPA[191] concernant les pesticides utilisant du mercure (Federal Insecticide, Fungicide and Rodenticide Act - FIFRA), la décharge de mercure dans les eaux (Federal Water Pollution Control Act) ainsi que dans le domaine de l'industrie du chlore et de la soude caustique. Aujourd'hui, on cherche à réduire et à traiter les rejets de mercure issus des dernières industries employant ce métal (extraction de l'or, production du chlore et soude caustique) ainsi qu'à recycler tout appareillage utilisant du mercure. La plupart des produits contenant du mercure (désinfectants, fongicides, peintures, composés pharmaceutiques, etc.) sont éliminés du marché et on cherche également à remplacer

[184] BIDSTRUP 1964, p2

[185] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p1 et 10

[186] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p10

[187] GOLDWATER, 1981

[188] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p10

[189] MARÉCHAL, 1999

[190] U.S. EPA, 1977, p70

[191] LES DEFINITIONS DES ABREVIATIONS SE TROUVENT DANS L'ANNEXE 21

toute l'instrumentation qui en utilise. Certains instruments comme les redresseurs à vapeur de mercure ont été naturellement remplacés par l'évolution technologique, d'autres instruments sont spécialement développés afin d'éliminer au maximum la présence de mercure dans la technologie (thermomètre à alcool et numérique ; manomètre à aiguille, anéroïde et numérique, interrupteurs divers, etc.) [192]. Finalement, diverses lois et directives (voir chapitre 2.5) ont été mises en place pour interdire la commercialisation ainsi que la fabrication et réduire l'utilisation de certains instruments et objets contenant du mercure. Aujourd'hui, l'utilisation de mercure tend donc vers la diminution. Cependant, les démarches prises dans ce sens, essentiellement par les pays industrialisés, ont favorisé l'emploi de ce métal dans des zones moins développées (offre supérieure à la demande) dans lesquelles les réglementations et restrictions sont moins complètes et moins bien appliquées[193].

2.4.2 DONNEES TOXICOLOGIQUES

Le mercure se trouve naturellement présent dans notre environnement à l'état natif ou sous forme de minerais dont le principal est le sulfure de mercure (HgS - cinabre). Il apparaît également sous forme gazeuse dans l'air ambiant (évaporation, volcan, etc.) ainsi que sous diverses formes dans l'eau et le sol. La quantité de mercure, liée à l'activité humaine, présente dans notre écosystème est négligeable par rapport à celle qui est issue du processus naturel. Le problème provient du fait que cette activité humaine a favorisé l'augmentation de la concentration de mercure dans certaines zones et rendu sa présence dangereuse pour l'homme et son environnement. La toxicologie du mercure est, de nos jours, largement étudiée et se manifeste de façons diverses en fonction de la forme sous laquelle il se trouve (mercure élémentaire, composés inorganiques, composés organiques). Les études les plus pertinentes sur la toxicologie du mercure sont publiées par trois grands organismes internationaux : The World Health Organization (WHO), The United Nation Environment Program (UNEP) et The International Labour Organization (ILO). Ces publications comprennent des fiches toxicologiques internationales pour le mercure élémentaire ainsi que ses principaux composés qui sont présentées en annexe 3.

2.4.2.1 Le mercure élémentaire

Le mercure élémentaire ou mercure métallique est, comme nous l'avons vu, celui que nous pouvons trouver dans divers instruments et appareils. C'est sous la forme de vapeur que le mercure élémentaire est le plus dangereux pour la santé humaine et ce dernier forme facilement (pour un métal), à température ambiante, des vapeurs inodores et incolores dont la vitesse d'évaporation (7 μg par cm^2 de Hg par heure, à 20°C) augmente fortement avec une augmentation de la température[194]. De plus, la valeur de concentration de vapeurs saturantes, c'est-à-dire la quantité maximum de vapeur de mercure que peut contenir un espace défini, est de 13.18 mg/m^3 à 20°C (29.46 mg / m^3 à 30°C), ce qui représente une valeur 130 fois supérieure à la limite recommandée pour les lieux de travail par l'Occupational Safety & Health Administration (OSHA) et 13000 fois supérieure à la valeur

[192] ENVIRONNEMENT CANADA, 2002[1]

[193] UNEP Chemicals, 2002

[194] INTERNET[6]

recommandée par la WHO[195]. La grande persistance et mobilité de la vapeur de mercure est également un facteur toxicologique important : les vapeurs persistent dans l'atmosphère pendant plus de deux ans et sont capables de parcourir 2500 kms en 72 heures[196]. Le danger représenté par le mercure métallique est également lié à son comportement sur une surface donnée : lorsqu'il est répandu violement (accident), ce dernier se sépare en gouttelettes de plus au moins petites dimensions (atteignant l'ordre du centième de millimètre) possédant une grande mobilité (liquide), ce qui favorise l'éparpillage et peut rendre la décontamination très compliquée, selon l'état de la surface concernée. Cette dernière particularité favorise également l'augmentation de la surface de mercure exposée à l'air libre et ainsi la libération de vapeurs : 0.25 ml de mercure répartis en billes de 10 μm représente une surface de 15 cm^2 [197]. Pour illustrer cette problématique, prenons le cas du bris d'un gros thermomètre médical (~0.25 ml) dans une salle de bain (~10 m^3) à une température de 20°C: en considérant que la moitié du thermomètre (0.125 ml) s'est éparpillé en billes de 10 μm, la surface de mercure exposée est de 7.5 cm^2. En prenant la vitesse d'évaporation de 7 μg par cm^2 de Hg par heure, à 20°C, ce déversement dégage 52.5 μg (7 x 7.5) de vapeur par heure. En considérant le volume de la pièce (10 m^3), la concentration de vapeur de mercure dans l'air serait de 5.25 $\mu g/m^3$ (52.5 / 10) au bout d'une heure, valeur déjà cinq fois supérieure aux recommandations de la WHO. Le cas est un peu extrême dans le sens ou du mercure rependu ne se sépare jamais complètement en billes de 10 μm, mais ceci donne néanmoins une idée des problèmes que pourrait causer, sur le long terme, un déversement minime de mercure s'il n'est pas convenablement nettoyé. Sachant que les vapeurs de mercure ont une forte densité (6,39) et donc une tendance à s'accumuler près du sol, cette situation est particulièrement dangereuse pour les enfants en bas âge (plus exposés que les adultes), d'autant plus que leurs organes sont en cours de développement[198].

Parmi les différentes voies d'absorption du mercure élémentaire, l'inhalation est celle qui représente le plus grand danger pour la santé humaine, car 80% du mercure absorbé est retenu par le corps humain[199]. Les alvéoles pulmonaires retiennent 100% du mercure absorbé qui passe ensuite rapidement dans le sang pour atteindre les divers organes du corps (cerveau, rein, foi). Le simple contact cutané avec le mercure ne semble pas poser de problèmes d'intoxications graves, mais l'absorption du mercure élémentaire (liquide et gazeux) par la peau peut contribuer à la toxicité globale de la personne concernée[200]. De plus, certaines personnes sensibles peuvent développer des allergies cutanées au contact du mercure[201]. L'ingestion n'est pas une voie typique d'exposition au mercure élémentaire, car celui-ci est mal absorbé par le tractus gastro-intestinal (0.01%)[202]. Cette propriété dépend néanmoins de certaines particularités liées à la personne (alimentation, par

[195] INRS, 2003, p8

[196] RISHER, 2003

[197] INTERNET[1]

[198] RISHER, 2003, p45

[199] RISHER, 2003, p12

[200] INTERNET[7]

[201] RISHER, 2003, p12

[202] RISHER, 2003, p12

exemple) et des cas d'ingestion accidentelle de quelques grammes ont montré une augmentation du taux de mercure dans le sang. Le système nerveux central est extrêmement sensible à l'exposition aux vapeurs de mercure élémentaire et généralement responsables de nombreux symptômes (tremblement, fatigue, instabilité émotionnelle, etc.)[203]. La présence de quantités élevées de mercure élémentaire dans le corps humain induit des effets dans la plupart des organes et dans les cas fatals, la cause de la mort est souvent attribuée à des insuffisances respiratoires, des arrêts cardiaques ou des œdèmes cérébraux[204]. Aujourd'hui, l'utilisation de mercure élémentaire, au niveau industriel, est bien réglementée et surveillée et les cas d'intoxication en milieu professionnel sont plutôt rares. Néanmoins, ce métal est encore employé dans divers procédés industriels (exploitation de l'or et de l'argent, production de soude caustique et de chlore, dentisterie) et types d'instrumentations (manomètres, commutateurs électriques, lampes fluorescentes). Les cas d'intoxication surviennent aujourd'hui essentiellement dans le domaine scolaire ou privé où le manque d'information amène à des actes de négligence par rapport aux dangers du mercure (utilisation inadaptée, bris d'instruments). Ainsi, il est encore fréquent que des enfants trouvent du mercure métallique, le ramènent chez eux et même parfois l'utilisent à des fins récréatives. Les conséquences de ce genre de cas peuvent être désastreuses et engendrer, en plus des problématiques de santé, des coûts très importants liés à la décontamination. Des cas plus extrêmes d'intoxication ont été mentionnés dans divers ouvrages décrivant les effets toxicologiques du mercure. Par exemple, quatre adultes exposés à de fortes concentrations de vapeurs de mercure dans leur lieu d'habitation, après la tentative de refonte d'un amalgame dentaire, sont décédés suite à des insuffisances respiratoires (11 à 18 jours après exposition, le niveau de concentration de vapeurs de mercure dans l'air était de 0.8 mg/m^3, soit 8 fois supérieur à la norme en vigueur pour les lieux de travail)[205].

2.4.2.2 Les composés inorganiques

L'effet toxique des composés inorganiques du mercure sur l'être humain est généralement plus faible que les deux autres formes. Dans l'ensemble, le mercure sous forme de sels n'est que faiblement absorbé par inhalation[206]. L'ingestion ainsi que l'absorption cutanée semblent être les principales voies d'une intoxication. Le risque d'intoxication lié à l'ingestion de composés inorganiques du mercure dépend de leur solubilité (capacité à traverser les barrières internes du corps humain) et les composés mercuriques (Hg^{2+}) qui sont plus solubles sont généralement plus dangereux[207] [208]. Le chlorure mercurique ($HgCl_2$) semble être souvent lié à des cas d'intoxication et un grand nombre d'études sur la toxicité des composés inorganiques du mercure sont basées sur ce composé[209]. Les premiers effets des composés inorganiques du mercure touchent souvent les tissus avec lesquels ils entrent en contact (irritation). Les effets plus avancés d'une intoxication sont généralement liés à des

[203] RISHER, 2003, p29
[204] RISHER, 2003, p29
[205] RISHER, 2003, p22
[206] RISHER, 2003, p13
[207] RISHER, 2003, p13
[208] RISHER, 2003, p30
[209] BIDSTRUP 1964, p29

difficultés rénales, des problèmes cardiovasculaires ou encore des dommages gastro-intestinaux[210]. La plupart des cas d'intoxication dus aux composés inorganiques du mercure semblent être survenus suite à l'ingestion de médicament ou l'application de crèmes contenant des pourcentages élevés de sels de mercure. Par exemple, un enfant de quatre mois traité avec un produit contre l'eczéma, contenant de l'oxyde de mercure rouge, s'est retrouvé dans le coma après avoir démontré divers symptômes tels que raideur et tremblement musculaire et acrodynie. Un autre cas démontre qu'un patient adulte est décédé d'insuffisance rénale suite à l'application répétée (2 mois) d'un traitement chinois à base de chlorure mercureux (Hg_2Cl_2).

2.4.2.3 Les composés organiques

Dans l'environnement, les composés organomercuriels sont généralement issus d'une transformation biologique (voir section 2.2.3.2) à partir de mercure élémentaire ou des composés inorganiques du mercure présents dans les sols ou les eaux. Les composés organiques les plus étudiés dans le domaine de la toxicologie sont les composés alkylmercuriels dont les deux principaux sont connus sous les noms de composés de méthylmercure (CH_3Hg^+) et diméthylmercure ($Hg(CH_3)_2$)[211]. Ces composés sont extrêmement toxiques : ils sont rapidement absorbés par tous les tissus du corps (foie, cerveau, placenta) et attaquent le système nerveux[212] [213]. Les principaux risques de ces composés sont liés à leurs tendances à la bioaccumulation et à leur grande solubilité dans l'eau, qui leur permettent de s'introduire dans la chaîne alimentaire (bactéries, plantes, animaux) [214] [215]. Ainsi, les deux plus grands cas d'intoxication au méthylmercure, connus de nos jours et déjà mentionnés plus haut, sont dus à l'ingestion de poisson contaminé suite au déversement de résidus mercuriels dans un lac (baie de Minamata – Japon - 1950) et de céréales traitées à l'aide de fongicides à base de mercure (Irak - 1972). De nos jours, les produits agricoles contenant du mercure sont interdits et les rejets mercuriels des industries sont réglementés et ce genre de cas ne devrait plus avoir lieu. Encore une fois, les pays en voie de développement sont davantage exposés en raison de la faible réglementation. Les composés organiques du mercure peuvent également être présents dans le domaine laboratoire. Un cas d'intoxication de ce genre, survenu en 1996 en Allemagne, démontre que le dimethylmercure est une substance à haut risque qui pénètre facilement la peau et peut être fatale en petites quantités[216]. Le Dr. Karen Wetterhahn, professeur de chimie connue pour ses recherches sur les cycles redox intracellulaire des métaux, est morte 298 jours après avoir accidentellement répandu quelques gouttes de diméthymercure dans son gant[217].

---

[210] RISHER, 2003, p30

[211] INRS, 2003, p12 et 16

[212] ENVIRONMENT, SAFETY AND HEALT, 2000

[213] THEAKSTON, 2000

[214] BIDSTRUP 1964, p6

[215] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005[2]

[216] ENVIRONMENT, SAFETY AND HEALT, 2000

[217] PARSONS & PERCIEVAL, 2005, p10

2.4.3 METHODES DE DETECTION

Généralement, ce sont les symptômes observables sur la personne concernée qui permettent de déceler un cas d'intoxication. Dans le cas du mercure et de ses composés, le début d'une intoxication chronique n'est pas facilement identifiable car les symptômes observés sont souvent ceux d'autres cas plus courants (léger tremblement, perte d'appétit, fatigue, insomnie, etc.). Ainsi divers exemples de cas d'intoxication au mercure ont été diagnostiqués et traités comme étant simplement du stress, de la fatigue psychique ou autres. En cas d'intoxication au mercure possible ou attestée certaines analyses doivent être réalisées afin de confirmer la cause de l'intoxication et d'en évaluer la gravité.

2.4.3.1 Symptômes

Les symptômes physiques et psychiques liés à une intoxication au mercure peuvent varier selon le type de composé, la quantité et le mode d'ingestion, le temps d'exposition, ainsi que la résistance de la personne. L'importance des symptômes est généralement dépendante du type d'intoxication que l'on peut définir à travers deux cas de figure : l'intoxication aiguë qui est l'exposition à une dose massive pendant une courte durée et l'intoxication chronique qui est l'exposition à une dose répétée sur une longue période. Les symptômes d'une intoxication chronique se caractérisent généralement par un léger tremblement (d'abord les mains, puis le reste du corps), une perte d'appétit, de la fatigue/insomnie, une perte de mémoire, des troubles de comportement (musculaire, sensibilité, humeur) ainsi que des troubles de l'appareil digestif[218]. Ces symptômes sont généralement faibles au début et deviennent de plus en plus importants au cours de l'exposition. Une intoxication aiguë est caractérisée par de la fièvre, des frissons, de la toux, de l'essoufflement, un sentiment d'oppression, des brûlures dans la poitrine et une inflammation respiratoire ainsi que les mêmes symptômes qu'une exposition chronique, mais ressentis d'une manière plus intense[219]. Chez certaines personnes, le mercure (inhalé, ingéré ou touché) peut également provoquer des réactions cutanées plus au moins violentes. Ainsi, des symptômes tels que dermatose et urticaire faciales, infection de la bouche et dermatoses généralisés ont été identifiés sur des patients montrant une allergie suite à l'application d'amalgames dentaires ou à la rupture de thermomètres.[220] Des rougissements et/ou chute de la peau sur les plantes palmaires et plantaires ont également été identifiés comme signes d'intoxication au mercure[221]. Des informations précises sur les symptômes correspondant à la forme du mercure responsable de l'intoxication peuvent être trouvées dans la littérature spécialisée[222, 223, 224].

2.4.3.2 Analyses

Suite à la détection ou à la supposition d'une intoxication au mercure, des analyses peuvent être entreprises afin de quantifier le mercure présent dans le corps humain et d'évaluer ainsi la gravité de

[218] INTERNET[7]

[219] INTERNET[7]

[220] FRIBERG, 1991

[221] RISHER, 2003, p28

[222] INTERNET[7]

[223] INTERNET[8]

[224] RISHER, 2003

la situation ou l'efficacité du traitement de désintoxication. Ces analyses sont généralement effectuées sur trois types de prélèvements ; le sang, l'urine et les cheveux. Une fois absorbé par le corps humain le mercure, qui se trouve d'abord sous la forme élémentaire (Hg°) dans le sang, est très rapidement oxydé (Hg^{2+}) et distribué vers les divers organes du corps (cerveau, rein)[225]. Ceci explique pourquoi l'analyse du sang soit généralement retenue pour les cas d'intoxication aiguë (analyse effectuée dans les trois jours après exposition)[226]. La concentration de mercure dans le sang est mesurée en μg de mercure par litre de sang (μg/l). La valeur correspondant à une personne non exposée au mercure inorganique est d'environ 5 μg/l, alors que la valeur de 15 μg/l est considérée comme étant la limite pour une personne exposée dans son lieu de travail[227]. L'analyse urinaire permet la détection de traces de mercure durant une période plus prolongée après exposition et est généralement employée dans le cas d'intoxications chroniques. Les concentrations sont mesurées en microgramme par gramme de créatine (μg/g). Une personne non exposée au mercure ne doit pas avoir une valeur supérieure à 3 μg/g[228]. Pour les personnes exposées, le niveau d'intoxication est évalué de la façon suivante : faible (inférieur à de 35 μg/g), modéré (35-50 μg/g), moyennement élevé (50-100 μg/g) et très élevé (supérieur à 100 μg/g)[229]. Généralement, ces analyses ne différencient pas la forme (inorganique, organique) du mercure présent dans l'organisme, mais donnent une quantité totale. Dans les cas d'intoxication au mercure inorganique, les analyses de sang (court terme) et d'urine (long terme) sont utilisées. Quant à l'analyse des cheveux, elle est inappropriée pour la quantification de mercure inorganique[230]. Dans les cas d'intoxication au mercure organique, les analyses de sang et de cheveux donnent de meilleurs résultats que l'urine qui n'est généralement pas employée[231] [232]. Les méthodes d'analyse employées pour la quantification de mercure dans le corps humain sont la spectrométrie d'absorption atomique (SAA), la spectroscopie de fluorescence atomique (SFA) et l'activation neutronique AAN. La méthode la plus courante est la spectroscopie d'absorption atomique à vapeur froide (CV – AAS), qui permet de détecter des valeurs en dessous du μg/l ou μg/kg[233]. La chromatographie en phase gazeuse (CPG) donne également de très bons résultats (en dessous du μg par litre ou par kilogramme)[234]. Malgré l'efficacité des analyses décrites ci-dessus dans ce domaine, une portion du mercure - celui qui est déjà absorbé par les organes – reste indétectable. De plus, il semble exister une phase intermédiaire dans le processus d'intoxication pour laquelle le mercure n'est identifiable ni dans le sang ni dans l'urine[235].

---

[225] THEAKSTON, 2000
[226] THEAKSTON, 2000
[227] MIQUEL, 2001
[228] INTERNET[7]
[229] INTERNET[7]
[230] RISHER, 2003, p15
[231] RISHER, 2003, p16
[232] THEAKSTON, 2000
[233] RISHER, 2003, p6
[234] RISHER, 2003, p6
[235] THEAKSTON, 2000

2.4.4 AUTRES DANGERS

Le mercure peut représenter d'autres risques pour la santé humaine qui ne sont pas liés à son caractère toxique. Ainsi, certaines incompatibilités du mercure élémentaire (Hg°) avec d'autres matériaux peuvent engendrer, dans certaines conditions, des risques d'explosion : agents oxydants puissants (dioxyde de chlore, acide peroxyformique, chlorate, nitrate), ammoniac + eau, composés acétyléniques. D'autres substances peuvent engendrer des réactions violentes lorsqu'elles sont mises en contact avec du mercure: brome sec, carbure de sodium[236]. Certains composés du mercure représentent des risques particuliers liés à leurs propriétés. Le fulminate de mercure $Hg(ONC)_2$ est un détonateur puissant qui risque d'exploser lors de chocs. L'oxyde mercurique (HgO) est un oxydant puissant qui risque de provoquer une mise à feu lorsqu'il est en contact avec les matériaux organiques[237]. Le mercure comporte également la particularité de dissoudre de nombreux métaux (cuivre et alliages, bronze, zinc, plomb, étain, aluminium, argent, or et métaux alcalins) formant des amalgames[238].

2.5 ORGANES DE GESTION

2.5.1 SITUATION GENERALE

Le mercure est aujourd'hui un des polluants les plus étudiés au niveau toxicologique, ce qui en fait un élément de choix pour la mise en place de toutes sortes de directives visant à limiter les dommages sur l'environnement et la santé humaine. Actuellement la société dans son ensemble cherche à diminuer progressivement son utilisation à l'échelle planétaire. Ses moyens sont législatifs mais les campagnes de promotion et d'information (sous la forme de normes, programmes) jouent un rôle capital. La gestion du mercure est un sujet d'actualité qui est loin d'être totalement maîtrisé et qui varie considérablement en fonction des pays. Certains d'entre eux (Danemark, Norvège, Suède) ont développé une législation complète, d'autres (Communauté Européenne, Etats-Unis, etc.) possèdent une législation en cours de développement, alors que la faible présence ou l'inexistence de mesures touchent la plupart des pays économiquement faibles ou en voie de développement[239]. Les mesures sur la gestion du mercure sont généralement prises à différentes échelles : mondiale (WHO, UNEP), communautaire (Commission des Communautés Européennes (CCE)), Nationale et régionale. La tendance tend vers une harmonisation entre ces diverses entités et l'objectif semble être la gestion du problème à une échelle communautaire et mondiale. En attendant, les entités nationales et régionales jouent, encore aujourd'hui, un rôle très important dans la mise en place de directives et recommandations. La gestion du mercure est réalisée à travers diverses mesures que l'on peut classifier en quatre groupes[240] :

---

[236] INTERNET[7]

[237] ENVIRONMENT, SAFETY AND HEALT, 2000

[238] INTERNET[7]

[239] UNEP Chemicals, 2002, appendix

[240] UNEP Chemicals, 2002, pVII

- Mesures et réglementations visant à maîtriser les rejets de mercure dans l'environnement (industries, traitement des déchets, exploitations minières, etc.) ;
- Mesures et réglementations de contrôle des produits renfermant du mercure (aliments, médicaments, instrumentation, etc.) ;
- Normes de qualité de l'environnement, spécifiant une concentration maximale admissible de mercure dans différents milieux tels que l'eau de consommation courante, les eaux de surface, l'air et le sol, et pour des aliments tels que le poisson;
- Autres normes, mesures et programmes, tels que des réglementations relatives à l'exposition au mercure sur le lieu de travail, des exigences en matière de communication des données, des conseils concernant la consommation de poisson et des mesures pour la sécurité du consommateur.

Des études sur la problématique mondiale du mercure sont régulièrement élaborées et publiées par l'UNEP. Leur dernière publication (*Global Mercury Assessment report*, 2002)[241] comporte une annexe donnant des informations sur les principales législations existantes sur le mercure en fonction des pays. Au niveau européen, la CCE publie également des études régulières sur l'avancement des mesures prises à l'échelle européenne (*Communication de la commission au conseil et au parlement européen - Stratégie communautaire sur le mercure*, 2005)[242]. Des informations sur la legislation relative au mercure sont également mises à disposition par des organismes nationaux et régionaux, repris ci-dessous.

2.5.2 REGLEMENTATIONS, NORMES, MESURES

Les directives portant sur le sujet étudié dans le présent travail (musée) concernent principalement les mesures et réglementations de contrôle prises pour les produits renfermant du mercure (particulièrement l'instrumentation) ainsi que les réglementations relatives à l'exposition au mercure sur les lieux de travail et les exigences en matière de communication des données. La situation actuelle concernant le commerce du mercure est également une donnée importante, car elle permet d'illustrer le déclin progressif de sa production et utilisation.

2.5.2.1 Commerce du mercure

Aujourd'hui, le plus grand exportateur de mercure reste l'union européenne (1000 tonnes par an) et le principal fournisseur au monde est l'entreprise espagnole MAYASA[243]. Cette dernière était responsable de la revente des stocks de la mine d'Almaden, mais sa principale source de mercure est, aujourd'hui, l'excédent des usines de chlore et de soude caustique. Actuellement, il n'existe pas de restrictions communautaires ou internationales au commerce du mercure métallique, mais le parlement européen vient d'adopter (mars 2006) une stratégie de la commission européenne dont l'un

[241] UNEP Chemicals, 2002

[242] COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 2005

[243] COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 2005, p6-7

des principaux buts est l'interdiction des exportations de mercure d'ici, au plus tard, 2010[244]. Certains pays ont totalement interdit l'importation et/ou l'exportation de mercure (Finlande, Suède, Gambie, Ghana, Guinée) et certains produits à base de mercure (peinture, pesticide, cosmétique) sont interdits à l'importation dans la plupart des pays[245]. Beaucoup de pays possèdent une législation relative au transport des matières dangereuses qui s'applique généralement aussi au mercure.

2.5.2.2 Instrumentation comportant du mercure

Les restrictions concernant la commercialisation et l'utilisation d'appareillages contenant du mercure sont principalement mises en place dans les pays industrialisés (Europe, Etats-Unis, Canada) et ce type de directive est pratiquement, voire totalement inexistante, dans les pays en voie de développement[246]. Les Pays-Bas, le Danemark et la Suède semblent être les pays les plus avancés dans ce domaine : interdiction générale concernant les produits utilisant du mercure (sauf certains instruments à applications spécifiques)[247,248]. La Suisse a interdit récemment la production de toute préparation et objet contenant du mercure, mais cette interdiction ne s'applique pas à tous les produits dont on ne connaît pas de substitut exempt de mercure[249]. Un article stipule également que les antiquités ne sont pas concernées par cette réglementation. D'une manière générale, les piles et accumulateurs contenant du mercure sont les plus concernés par la législation, car malgré les petites quantités de mercure mises en jeux, ces éléments ont été produits en très grandes quantités et pour de nombreuses applications. Ainsi, il existe de nombreuses lois publiées à ce sujet : Directive sur les piles de la communauté européenne[250], Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement[251], US Mercury-containing Battery Management Act[252]. Les directives concernant les piles et accumulateurs proposent généralement une abolition de la production et de la commercialisation, des restrictions au niveau de la quantité de mercure utilisée ainsi que des réglementations sur le traitement des déchets. En ce qui concerne les thermomètres à mercure, la Norvège possède une législation très stricte : la production, l'importation, l'exportation et la vente sont interdites[253]. En France et dans certains Etats des Etats-Unis, la législation concerne uniquement les thermomètres médicaux[254]. La catégorie des instruments de mesure et de contrôle n'est par contre pas couverte par la législation de la Communauté Européenne[255]. L'instrumentation électrique comportant du mercure ne fait généralement pas l'objet d'une législation spécifique et les efforts entrepris pour l'élimination de l'utilisation de ce genre d'instrumentation se traduisent par des

---

[244] Commission des Communautés Européennes, 2005[2]

[245] UNEP Chemicals, 2002, appendix

[246] UNEP Chemicals, 2002, appendix

[247] Environmentally Hazardous Substances Act

[248] UNEP Chemicals, 2002, appendix, p59-64 et 67

[249] CONSEIL FEDERAL SUISSE, 2005

[250] COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 1998

[251] CONSEIL FEDERAL SUISSE

[252] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY EPA, 1996

[253] UNEP Chemicals, 2002, appendix, p65

[254] MINISTERE DE L'EMPLOI ET DE LA SOLIDARITE, 1999

[255] UNEP Chemicals, 2002, appendix, p59-60

campagnes d'information favorisant leur remplacement par d'autres composants exempts de mercure. Ce genre de campagne cible parfois le domaine des véhicules dans lesquels l'utilisation de composants électriques est importante. Une proposition de directive a été émise en l'an 2000 par la Communauté Européenne dans le but d'éliminer l'utilisation du mercure dans les équipements électriques[256]. Malgré l'existence des directives citées ci-dessus, de nombreux pays européens, principalement ceux de l'Europe de l'Est, et du reste du monde ne semblent pas avoir pris de disposition sur la réglementation de l'instrumentation comportant du mercure[257].

Mis à part les dispositions légales existantes visant à réduire la présence de mercure, il existe un grand nombre d'organismes menant des recherches et/ou fournissant des informations (toxicologie, gestion, législation, etc.) contribuant également à la gestion de ce problème. Certaines d'entre elles sont parfois les protagonistes de l'approbation d'une nouvelle législation. Ces organismes peuvent être des entités internationales, nationales ou régionales et sont généralement spécialisées dans le domaine de la toxicologie et/ou de l'environnement. Sur le plan international, ce rôle est rempli par trois entités principales: la WHO, l'UNEP et l'ILO qui travaillent principalement sur des questions de santé publique et environnementales à une échelle planétaire, mais ont chacune leur spécificité. Alors que la WHO et l'UNEP possèdent principalement un rôle de divulgation et d'encouragement pour le respect de la santé et de l'environnement, l'ILO est responsable de la formulation des standards internationaux sous forme de conventions et de recommandations. La coopération entre ces trois organismes a conduit à la création d'une entité responsable de la gestion des produits chimiques : The International Program on Chemical Safety (IPCS). Le rôle principal de cette entité est l'établissement des bases scientifiques nécessaires à l'utilisation, en toute sécurité, des produits chimiques. En ce qui concerne la toxicologie du mercure, un document complet a été publié en 2003 : Elemental Mercury and Inorganic Mercury Compounds : Human Health Aspects[258]. Les travaux de l'IPCS et du centre canadien de l'hygiène et de la sécurité au travail (CCHST) ont permis la création d'une base de données internationale dont le but est de permettre l'accès public à une documentation complète sur la sécurité relative aux produits chimiques : Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations (IPCS INCHEM). Les organismes cités ci-dessus peuvent être considérés comme les références en matière d'information sur le mercure au niveau international. Certains organismes nationaux ont été spécialement conçus dans le cadre de la problématique de la gestion du mercure : The Collaborative Mercury Research Nettwork (COMERN - Canada) dont l'objectif est l'étude scientifique du cycle du mercure dans notre écosystème et The Mercury Technology Services (MTS – Etats-Unis) qui fournit une assistance technique (évaluation, décontamination) aux entreprises touchées par des problématiques liées au mercure. Certains organismes nationaux, principalement aux Etats-Unis (EPA, OSHA, ACGIH), sont reconnus sur le plan international et émettent des standards (voir section suivante) qui ont été également repris en Europe. Les autres entités fournissant des informations (toxicologie, législation, etc.) sur le mercure

[256] LE PARLEMENT EUROPEEN, 2003

[257] UNEP Chemicals, 2002, appendix

[258] RISHER, 2003

sont des organismes nationaux ou régionaux spécialisés dans la toxicologie, la sécurité dans les lieux de travail et la protection de l'environnement. Le tableau présenté en annexe 4 donne les références des organismes internationaux ainsi que des principaux organismes nationaux.

2.5.2.3 Normes relatives à l'exposition humaine

Les nombreuses études élaborées sur le sujet de la toxicité du mercure ont conduit à la mise en place de normes visant à limiter l'exposition de la population et de l'environnement. Ces dernières se traduisent généralement par la définition de taux maximums de concentration en mercure (poids/volume) tolérés dans divers milieux (solide, liquide, gazeux). Divers domaines sont concernés en fonction du type d'exposition :

- Environnement (air, eau, sol) ;
- Produits de consommation (batteries, aliments, médicaments, pharmaceutiques) ;
- Rejets industriels (exploitation minière, production de soude caustique et chlore, traitement des déchets) ;
- Exposition due à l'activité professionnelle et sociale.

La dernière catégorie est celle qui nous intéresse dans le cadre de notre travail, car la présence d'objets contenant du mercure dans le domaine muséal, engendre essentiellement des problématiques liées à la santé des personnes impliquées. Les normes réglementant l'exposition au mercure due à l'activité professionnelle et sociale se traduisent par la mise en place de valeurs limites d'exposition et la concentration en vapeur de mercure dans l'air est le paramètre le plus étudié. Ces concentrations sont généralement exprimées en microgrammes par mètre cube d'air ($\mu g/m^3$) ou en mg/m^3 pour les vapeurs de mercure et en ppm (partie par million : 1 ppm est équivalent à 1 $\mu g/g$) pour les concentrations mesurées dans des échantillons solides ou liquides. Certaines de ces valeurs servent uniquement de recommandation, d'autres sont utilisées dans le milieu professionnel comme réglementation. Il faut donc différencier les recommandations émises par des organisations internationales comme la WHO qui sont applicables à la population d'une manière générale et les limites émises par des organismes nationaux, qui s'appliquent uniquement aux lieux de travail. La limite d'exposition pour le mercure, fixée par l'organisme mondial de la santé, est de 1 $\mu g/m^3$ [259]. Il existe divers types de limites fixées pour le milieu professionnel pour le mercure: les limites fixées pour une journée de travail, les limites fixées pour une courte durée ainsi que les valeurs représentant un danger immédiat. Les valeurs fixées pour une durée déterminée de travail sont celles que l'on retrouve le plus fréquemment. Ces dernières sont généralement définies pour chaque pays et se situent entre 0.01 et 0.1 mg/m^3. Les valeurs émises aux Etats-Unis, par l'ACGIH et OSHA, semblent être les plus utilisées. Voici la définition des principales abréviations employées pour caractériser les taux de concentration de polluants dans l'air.

[259] RISHER, 2003

PEL (Permissible Exposure Limits) : concentration maximum d'exposition tolérée pour un travailleur, selon la réglementation de l'OSHA. Les PEL peuvent, selon cette régulation, être exprimées en valeurs plafond (ceiling value) identifiées par la lettre C et en TWA (Time Weighted Averages)[260].

TWA (Time Weighted Averages) : concentration moyenne pondérée en fonction du temps pour une journée de travail (8 heures) et une semaine de travail (40 heures) normales, à laquelle la quasi-totalité des travailleurs peuvent être régulièrement exposés, jour après jour, sans effet(s) néfaste(s)[261]. Cette valeur est définie par l'OSHA[262].

VEMP (Valeur d'Exposition Moyenne Pondérée) : concentration moyenne, pondérée pour une période de 8 heures par jour, en fonction d'une semaine de 40 heures, d'une substance chimique (sous forme de gaz, poussières, fumées, vapeurs ou brouillards) présente dans l'air au niveau de la zone respiratoire du travailleur[263].

TLV (Threshold Limit Value) : concentration maximum tolérée d'un polluant dans l'air, définie pour une certaine période de temps. Il existe une autre valeur limite, TLV – STEL (Threshold Limit Value - Short Term Exposure Limit), qui est la concentration d'exposition maximum pour une courte durée (généralement 15 minutes). Ces valeurs sont définies par l'ACGIH[264].

VME (Valeur (limite) Moyenne d'Exposition) : concentration moyenne dans l'air des postes de travail en un polluant donné qui, en l'état actuel des connaissances, ne met pas en danger la santé de la très grande majorité des travailleurs sains qui y sont exposés, et ceci pour une durée de 42 heures hebdomadaires, a raison de 8 heures par jour, pendant de longues périodes[265].

VLE (Valeur Limite d'Exposition) : concentration maximum dans l'air des postes de travail en un polluant donné, pour une courte durée (généralement 15 minutes)[266].

IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) / DVIS (Danger Immédiat Pour la Vie et la Santé) : concentration présentant un danger immédiat pour la vie ou la santé à laquelle un travailleur doit se soustraire rapidement sous peine de ne plus pouvoir le faire ou de conséquences irréversibles pour sa santé[267].

---

[260] INTERNET[9]

[261] SECRETARIAT DES NATIONS UNIES, 2003, p2

[262] INTERNET10

[263] INTERNET11

[264] INTERNET12

[265] SUVAPRO, 2005

[266] SUVAPRO, 2005

[267] SECRETARIAT DES NATIONS UNIES, 2003

Le tableau suivant présente les quatre principales valeurs existantes pour les limites de concentrations en vapeur de mercure dans l'air pour les lieux de travail ainsi que les pays dans lesquels elles font références[268].

Limite d'exposition mg/m^3	**Pays concernés**
0.01	Estonie, Hongrie, Suède (NGV)
0.025	Australie (TWA), Ontario/CA, Californie/USA (PEL), Belgique, Colombie-Britannique/CA (TWA), Etats-Unis (TLV), Danemark, Espagne (VLA-ED), Japon (0.025), Nouvelle Zélande (WES), Pays-Bas (MAC)
0.05	Autriche (MAK – werte), Québec/CA (WEMP), Alberta/CA, Michigan/USA (TWA), Minnesota/USA (TWA), Washington (TWA), Finlande, France (VLEP)
0,1	Etats-Unis (PEL)

Tab.1 - Limite d'exposition en milieu professionnel aux vapeurs de mercure dans un certain nombre de pays. Les lettres placées entre parenthèses après le pays correspondent à l'abréviation d'identification de ces limites (en plus de celles répertoriées précédemment on trouve, NGV, VLA-ED, WES, MAC, MAK-werte, WENP et VLEP

La seule valeur IDLH/DIVS pour le mercure semble être définie par l'NIOSH et correspond à : 10 mg/m^3.

Des valeurs de concentrations maximums de mercure dans l'air définies pour une courte durée (TLV – STEL, VME) ainsi que des valeurs définies pour les composés (inorganiques et organiques) existent également dans certains pays et sont répertoriées (pays) par l'organisation internationale du travail (OIT) - Centre international d'informations de sécurité et santé au travail[269].

2.6 LES SYSTEMES DE PROTECTION

A partir du moment où une substance est légalement considérée comme toxique et que des directives sont mises en place par les instances locales et gouvernementales, de nombreux moyens sont développés dans le but de protéger l'homme et l'environnement. Ceci se traduit généralement par la commercialisation de matériel de protection individuel et d'appareils de contrôle ainsi que par la divulgation d'informations permettant de prévenir et gérer d'éventuels accidents. Le but de ce chapitre est de fournir les informations sur les méthodes de protection individuelle et le contrôle lié à la toxicité du mercure. Les directives de base concernant la manière de prévenir et de gérer d'éventuels accidents sont également prises en compte. Les informations présentes concernent principalement le

[268] INTERNET[13]

[269] INTERNET[13]

mercure élémentaire (forme la plus courante) et les composés du mercure sont uniquement énumérés lorsque cela s'avère nécessaire (informations pertinentes).

2.6.1 PREVENTION

Comme toute substance toxique, les principaux actes de prévention liés au mercure concernent le stockage, la manipulation, ainsi que l'utilisation de matériel de protection personnelle.

2.6.1.1 Stockage

Le mercure doit être stocké dans un environnement frais (~18°C), sec, à l'abri de la lumière, pourvu d'une bonne ventilation et ne comportant pas de substances incompatibles (voir annexe 3). Le lieu de stockage (armoire) ainsi que les récipients en contenant doivent toujours être clairement identifiés. Voici un exemple d'identification : ATTENTION : FORMATION DE VAPEURS DANGEREUSES A TEMPERATURE AMBIANTE – PEUT-ETRE FATAL PAR CHAUFFAGE – A UTILISE AVEC UNE VENTILATION ADEQUATE - NE PAS RESPIRER LES VAPEURS – EVITER TOUT CONTACT AVEC LA PEAU[270]. L'étiquette d'origine du produit représente également un bon moyen d'identification. Les récipients employés pour le stockage doivent être constitués d'un matériau qui résiste chimiquement au contact du mercure ainsi que de ses vapeurs et qui ne puisse pas se briser facilement. Certains verres de type laboratoire (PYREX®, SIMAX®) présentent l'avantage d'être très résistants chimiquement et d'être suffisamment épais pour ne pas céder sous le poids du mercure. Cependant, ce matériau n'est pas considéré comme un contenant sûr en cas de choc. Les récipients en verre contenant du mercure devraient toujours être stockés dans un deuxième récipient incassable qui servirait de contenant en cas de rupture. Il semblerait que les récipients à base de polymère ne soient pas recommandés pour le stockage de mercure (formation de composés organométalliques)[271]. Dans le cas du verre, les quantités de mercure stockées par récipient ne devraient pas dépasser les 500mL, quantité au-delà de laquelle ce dernier devient difficilement manipulable (poids élevé). Pour de plus grandes quantités, les récipients en métal semblent être généralement employés. Les métaux comportant une bonne résistance à la corrosion par amalgamation sont le fer, l'acier, le nickel et le molybdène ; tout autre métal ne doit jamais être employé comme contenant pour le mercure[272]. Etant donné la grande masse volumique du mercure (13.6 fois supérieure à l'eau), la quantité stockée devrait toujours être un des critères de sélection pour le récipient (matériau, épaisseur). Tout récipient contenant du mercure doit être fermé hermétiquement et stocké dans un bac de rétention dont la capacité est supérieure à la quantité totale de mercure présente. Le type de récipient et emballage doit toujours être adapté au type de transport effectué (distance du lieu de destination et type de transport)[273]. Seul le personnel informé des risques que représente le mercure ainsi que des précautions à prendre concernant ce matériau devrait avoir accès au lieu de stockage et à la manipulation du mercure.

[270] INTERNET[13]

[271] INRS, 2003, p2

[272] INTERNET[7]

[273] INTERNET[7]

2.6.1.2 Manipulation

Toute manipulation de mercure devrait être réalisée dans un local normalement chauffé (18°C), en dessous d'une hotte aspirante en dessus d'un bac de rétention. Le sol de la zone de travail doit être constitué de surfaces lisses et non poreuses et dans le cas contraire, protégé à l'aide d'un plastique ou autre surface lisse compatible. Toute manipulation inutile devrait être évitée et le personnel responsable informé des dangers que représente le mercure et des marches à suivre en cas d'accident (déversement). Le comportement du mercure, sous sa forme métallique, peut être délicat et nécessite une attention particulière de la part du manipulateur lors du déplacement d'un récipient ou du transfert du matériau (grande densité, déplacement du centre de gravité). Le personnel manipulant du mercure devrait toujours être équipé du matériel de protection personnelle nécessaire et adapté à la situation.

2.6.1.3 Protection personnelle

Le matériel de protection personnelle devrait être au minimum constitué d'habits et chaussures de travail, de protection respiratoire, protection oculaire et gants. Les matériaux recommandés pour le matériel de protection (gants, tablier) sont les polymères à base de polyéthylène PE, copolymère éthylène-acétate de vinyle EVA/EVAC et polychlorure de vinylidène PVDC (4H® et Saranex®) ou d'autres produits élaborés à base de matériaux multicouches et/ou laminés (SilverShield/4H®, Responder®, Barricade®)[274]. Ces derniers ne doivent pas comporter de déchirures et doivent être suffisamment résistants (Tichem®) en cas de travail pouvant engendrer la destruction mécanique de la protection. Une attention particulière s'impose pour le choix du type de gants lorsque cela implique la manipulation du diméthylmercure (composé organique extrêmement toxique). Les protections respiratoires sont, généralement, de deux types différents : système à cartouche filtrante et système à adduction d'air. Le premier système peut se présenter simplement sous la forme d'un masque facial muni d'une ou deux cartouches (filtres) ou d'un masque facial relié à une unité comportant les filtres (ventilation assistée). Dans les deux cas, les cartouches employées doivent être spécialement développées pour filtrer le mercure sous forme de vapeurs et/ou de particules. Ces filtres sont commercialisés par de nombreux fabricants (3M®, Dräger®, North®, Survivair®, Interspiro®, MSA®) et généralement uniquement compatibles avec les masques de la même marque. Ils peuvent être employés avec un demi-masque facial (nez et bouche) ou un masque complet (visage). Les appareils à adduction d'air sont constitués d'un masque facial relié à une unité permettant l'apport d'air pur et ne sont pas spécialement développés pour les vapeurs de mercure. Le choix du type de masque à utiliser dépend de divers facteurs et il existe des guides à ce sujet, développés par la plupart des fabricants de matériels de protection individuelle et organismes de référence en matière de mercure[275,276]. Le choix du système respiratoire dépend également de la concentration en vapeur de mercure du local ou de la zone d'intervention. Un simple demi masque facial avec cartouche contre les vapeurs de mercure peut être employé jusqu'à une concentration de 0.5 mg/m^3 (5 fois la limite

[274] INTERNET[7]

[275] BOLLINGER, 2004

[276] 3M, 2006

recommandée) et l'utilisation du même système avec un masque complet permet une protection efficace contre un niveau de concentration de 2.5 mg/m^3 [277]. Ces recommandations s'appliquent uniquement au mercure inorganique et il existe des valeurs spécifiques pour les composés organiques du mercure[278].

2.6.2 SYSTEMES DE CONTROLE

De nombreuses méthodes ont été développées pour la détection, qualitative et/ou quantitative, des traces de mercure dans divers types de matériaux et environnements (air, eau, sédiments, poussières et autres surfaces). Certaines d'entre elles nécessitent le prélèvement d'échantillons analysés en laboratoire, d'autres permettent une lecture instantanée et ne nécessitent aucun prélèvement. Une grande partie de ces méthodes a été développée dans le but de contrôler les concentrations en mercure dans une optique environnementale et industrielle, afin de confirmer le respect des normes en vigueur et l'absence de danger pour la santé. Le risque lié aux vapeurs de mercure (environnement, milieu professionnel et privé) et la difficulté de les identifier (inodore, incolore) constituent un des aspects importants menant au développement de méthodes spécifiques. Le contrôle des eaux et des produits issus de rejets industriels, des déchets, de l'alimentation, des produits commerciaux ainsi que de la nature des sols sont d'autres exemples d'applications. Les procédés employés sont généralement quantitatifs, mais il en existe d'autres qui ne permettent qu'une lecture qualitative. Ces derniers sont généralement employés comme méthode de détection préliminaire ou comme moyen de confirmer le succès d'une décontamination.

2.6.2.1 Méthodes de détection directes

Les méthodes de détection directes permettent d'obtenir un résultat pratiquement instantané sur le lieu même de l'investigation. Généralement, celles-ci varient en fonction de la précision des résultats obtenus ainsi que des procédés employés pour l'analyse. La plupart des méthodes développées portent sur la quantification du mercure, sous forme de vapeur, dans l'air. Les mesures les plus précises sont obtenues à l'aide des appareils portables à lecture numérique (fig.7) développés par plusieurs fabricants (Jerome® MVA, Hg253 Portable Mercury Analyser, Zeman® Mercury analyser RA-915+). Le principe de détection employé varie selon l'appareil, mais il en existe trois principaux : l'amalgamation sur feuille d'or, l'absorption atomique et la photométrie ultraviolette (UV). La première technique utilise les propriétés de variation de la résistance d'une feuille d'or (capteur) en fonction de la quantité de mercure amalgamée sur cette dernière[279] (fig.7). La spectrométrie d'absorption atomique en vapeur froide (CVAAS) est un procédé employé en analyse de laboratoire (voir section 2.6.2.2) que l'on retrouve également sur certains appareils portables. La photométrie UV permet d'identifier la concentration d'un élément donné, en mesurant l'absorption d'un faisceau lumineux UV d'intensité connue par un échantillon. Ces appareils sont très performants au niveau de la précision, des limites de détection ainsi que de la rapidité de mesure, mais ils nécessitent généralement des budgets élevés. Des possibilités de location existent dans certains pays (Canada, Etats-Unis), mais ce

[277] NIOSH, 2005

[278] NIOSH, 2005[2]

[279] Arizona Instrument LLC, 2005, p8

genre de matériel est plutôt rare (voir annexe 5 pour la location proposée par Arizona Instrument LCC). Les organismes spécialisés dans la toxicologie environnementale possèdent généralement ce genre de matériel et constituent une source potentielle pour se le procurer.

Fig.7 - Détecteur de vapeurs de mercure Jerome J405 avec amalgamation sur feuille d'or[280]

Fig.8 - Tubes colorimétriques Dräger avec pompe électrique Accuro[281]

D'autres techniques, connues pour leur efficacité dans le domaine de la détection de contaminants atmosphériques, dont le mercure, utilisent un matériau absorbant possédant la particularité de changer de couleur en fonction de la concentration de mercure emmagasinée. Un de ces principes est connu sous le nom de tubes colorimétriques (fig.8) commercialisés par diverses entreprises (Dräger®, MSA®, Gastec®, Sensidyne®). Ceux-ci sont constitués de verre et sont généralement remplis d'une matière absorbante granuleuse, enduite d'un réactif, spécialement élaborée pour le type de contaminant à évaluer[282]. Ces tubes sont employés avec une pompe manuelle ou électrique (fig.8) portable permettant d'introduire un volume d'air connu dans le tube en verre. La modification de la couleur du tube indique la présence du contaminant, alors que la longueur de la portion colorée indique la concentration, directement lisible sur une échelle présente sur le tube[283]. Bien que plus abordable que les appareils à lecture numérique, ce principe reste relativement couteux. Une autre méthode plus abordable, mais également moins précise, consiste en une sorte de badge comportant diverses cellules enduites d'une substance absorbante sensible au contaminant choisi. La détection et la quantification de vapeur de mercure dans l'air est directement lisible sur le badge en comparant le changement de couleur des cellules avec une échelle colorimétrique fournie par le fabricant. Ces badges sont commercialisés par diverses compagnies (CHROMAIR®, SAFEAIR®) et comportent l'avantage d'être bon marché et de ne pas devoir avoir recours à un système de pompage ni d'analyse de laboratoire.

[280] ARIZONA INSTRUMENT LCC

[281] Dräger Safety

[282] Internet[14]

[283] Internet[15]

Le tableau présenté en annexe 6 donne les informations de base (principe, marge de mesure, fabriquant) sur diverses méthodes de mesure directes utilisées pour le mercure sous forme de vapeurs. Certains procédés développés permettent simplement une analyse qualitative et sont généralement employés pour la détection de mercure métallique. Un produit commercialisé sous le nom de Mercury Indicator® (J.T.Baker) est utilisé pour la détection de la présence de traces lorsqu'il est saupoudré sur une zone contaminée : la poudre vire au foncé lorsqu'elle entre au contact de mercure. Ce produit est également employé dans le domaine des musées botaniques comme méthode semi-quantitative de détection de vapeur de mercure dans les cabinets des herbariums[284]. Le principe consiste à diluer la poudre du produit commercialisé par J.T.Baker dans une certaine quantité d'eau (ceci pour permettre à la poudre de coller à la lamelle) et d'appliquer ensuite la solution pâteuse sur une lamelle de préparation en verre qui est placée dans l'environnement que l'on désire contrôler. La concentration de vapeur de mercure dans l'air peut être approximativement évaluée en observant le changement de couleur de la poudre et en la comparant aux valeurs numériques (fig.9) déterminées par l'étude de Catharine Hawks et al[285]. Cette méthode comporte l'avantage d'être pratiquement sans coût ; elle a néanmoins été développée pour des milieux confinés. Son application à des volumes importants doit encore être démontrée.

Fig.9 - Lamelles de préparation en verre avec poudre Mercury Indicator® en solution dans H_2O deionisée. Les couleurs représentent le degré d'exposition aux vapeurs de mercure : **A** - jaune = <1 µg/m^3; **B** – orange clair = 1 à 30 µg/m^3; **C** – gris-orange = 30 à 300 µg/m^3; **D** – gris foncé = > 300 µg/m^3 [286]

D'autres méthodes semblables consistent à imprégner un papier absorbant avec diverses solutions (chlorure de palladium, sulfure de sélénium et iodure de cuivre), qui lorsqu'elles sont mises en contact avec des vapeurs de mercure, changent de couleur[287]. Ces dernières méthodes, que l'on appelle

[284] HAWKS, 2004

[285] HAWKS, 2004, p787

[286] HAWKS , 2004, p787

[287] FEIGL, 1958, p364 - 366

communément spot tests, ne donnent que des résultats qualitatifs. La plupart des spot tests utilisés pour la détection de traces de métaux reviennent généralement à faire réagir leurs ions avec un réactif chimique sous la forme liquide. La firme SKC® (MercuryCheck® Test Kit) commercialise de tels spot tests prêts à l'emploi. Le MercuryCheck® Test Kit est un ensemble de petits bâtonnets, à usage unique, contenant un réactif chimique sous forme liquide. Lorsque le bâtonnet, comportant une petite brosse à son extrémité est écrasé, une ampoule contenant le liquide réactif se casse et ce dernier est appliqué sur la surface à tester. Un changement de couleur de la brosse indique la présence de mercure[288]. La présence de mercure sur des surfaces solides peut également être identifiée et quantifiée, de manière non destructive, à l'aide d'appareils portables plus sophistiqués tel que le spectromètre à fluorescence-X[289]. D'autres réactions utilisant divers composés chimiques sont à appliquer en laboratoire et nécessitent généralement l'utilisation de matériel spécifique (lamelles microscopiques, tubes à essais, microscope). Le tableau 2 présente diverses réactions employées pour la détermination de traces de mercure[290]. Chacune des ces réactions peuvent être assujetties à diverses interférences dues à la présence d'autres éléments dans les échantillons. Il convient de prendre connaissance (dans la littérature) de la nature de ces interférences avant de procéder aux tests.

Réactif	**Méthode**	**Réaction chimique**	**Résultat** (couleur)
Diphenylcarbazone	Lentille ou tube essai	-------	Bleu-violet
Diphenylthiocarbazone	Lentille en verre	-------	Orange
Iodure cuivreux	Papier filtre	$2Cu_2I_2 + Hg^{2+} \rightarrow Cu_2(HgI_4) + Cu_2^{2+}$	Orange-rouge
Chlorure stanneux et aniline	Papier filtre	**-------**	Brun-noir
Hypophosphite	Tube à essai	$2Hg^{2+} + H_2PO^{2-} + 2H_2O \rightarrow 2Hg° + PO_4^{3-} + 6H^+$	Rouge-rose
Acide chromotropique	Papier filtre	-------	Jaune-brun

Tab.2 - Diverses réactions employées comme spot tests pour la détermination de trace de mercure

D'autres spot tests, n'utilisant pas de réactif sous forme liquide, permettent d'identifier des traces de mercure [291]: test à l'eau régale et à l'aluminium et test avec appareil Mel-Temp® (Capillary Melting Point Apparatus). La première méthode utilise les propriétés que possèdent les sels de mercure solubles à corroder une feuille d'aluminium. La deuxième méthode est employée pour la détection de sulfure de mercure (cinabre – rouge). Celle-ci utilise la propriété que possède ce dernier à tourner au noir lorsqu'il est chauffé à environ 290°C et à libérer du mercure sous forme de vapeurs condensées lorsque la température est supérieure.

[288] INTERNET[16]

[289] SIROIS, 2001

[290] FEIGL, 1958, p57-72

[291] ODEGAARD, SCOTT CARROLL & WERNER, p74-76

2.6.2.2 Méthodes de détection indirectes

Certaines méthodes de détection nécessitent le prélèvement d'échantillons qui sont ensuite analysés à l'aide d'un appareillage de laboratoire. En ce qui concerne la détection de mercure dans l'atmosphère, il existe divers protocoles, dont les plus utilisés ont été développés aux Etats-Unis par le NIOSH (NIOSH 6009) et par l'OSHA (OSHA ID-140 et OSHA ID-145) – documents présents en annexe 7. D'autres publications telles que *Methods for the Determination of Hazardous Substances (MDHS)*, donnent des informations plus détaillées sur ce genre de procédés analytiques[292]. D'autres protocoles ont été développés pour la détection de traces de mercure dans divers types d'échantillons tels que : produits solides et aqueux (organique et inorganique), eau, poussières[293,294,295]. Ces protocoles, et principalement ceux délivrés par le NIOSH et l'OSHA, ne sont pas à proprement parlé des lois mais font généralement référence en matière de législation.

Généralement, une méthode d'analyse commence par le prélèvement d'un échantillon sous la forme gazeuse, solide, aqueuse ou liquide. Les difficultés liées à l'échantillonnage de substances gazeuses ont conduit à la mise au point d'une grande quantité de techniques. En ce qui concerne l'échantillonnage d'air pour la détection de traces de mercure dans l'air, le prélèvement se fait à l'aide d'une substance absorbante spécialement sélectionnée pour ses affinités avec ce contaminant. Cet absorbant est constitué d'une préparation granuleuse à base d'un mélange d'oxyde de cuivre et de manganèse (hopcalite) déposé sur une matrice en céramique[296]. Ce matériau est connu sous le nom de Hydrar® ou Anasorb® C300 (appellation donnée par l'entreprise SKC®) et est une adaptation (par SKC®) d'un produit commercialisé sous le nom de Carulite® 300 (Carus) utilisé comme catalyseur industriel[297]. Cet absorbant peut être employé dans des tubes en verre (SKC®, Dräger®), avec un appareillage électrique de pompage (échantillonneur actif) ou simplement sous forme de badge (échantillonneur passif). Les tubes employés en combinaison avec une pompe électrique (Active Sampler), commercialisés par les mêmes entreprises, permettent de faire passer un volume donné d'air au travers de la matière absorbante dont le rôle est de retenir le mercure. Le flux d'air doit être constant durant toute la durée de pompage et la vitesse (0.15 à 0.25 L/min) ainsi que le volume d'air (2 à 100L) nécessaire sont clairement définis par les méthodes de références[298]. Lorsque l'absorbant est employé dans un badge (Passive Sampler), l'échantillonneur est simplement accroché sur l'habit de travail (au niveau des voies respiratoires) ou posé dans la zone à contrôler. Dans le cas de la mesure de faibles concentrations, l'utilisation de l'échantillonnage de type actif est préférable[299]. Ce dernier permet également de récolter la vapeur de mercure sous sa forme particulaire (Hg^{2+}) en plus

[292] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 2002

[293] CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, 1999

[294] CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, 1977

[295] GUILLOT, 1996

[296] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 2002, p3

[297] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 2002, p3

[298] INTERNET[16]

[299] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 2002, p4

de la forme élémentaire (Hg°), ceci grâce à l'ajout d'un filtre en fibre de quartz au tube en verre[300]. Les échantillonneurs passifs ne sont pas adaptés pour l'analyse du mercure atmosphérique présent sous la forme de particules. Une fois le prélèvement effectué, l'absorbant doit généralement être analysé dans les trente jours et conservé dans des conditions précises (scellé dans l'emballage d'origine) et nécessite une préparation préalable. Généralement, ce dernier est dissout dans une solution d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique additionnée d'eau déionisée – tout le mercure est alors transformé sous sa forme ionique[301, 302]. Il existe une autre méthode permettant d'évaluer, d'une manière approximative, le niveau de contamination d'un local et les difficultés liées à une décontamination. Le principe consiste à prélever une certaine quantité d'échantillons de poussières aéroportées sur une surface lisse et de les faire analyser en laboratoire. Un protocole a été développé dans ce but par M. Jean-Guy Guillot, chimiste au centre toxicologique de l'INSPQ[303]. Ce protocole présente le moyen d'évaluation du niveau de contamination en fonction de la quantité de mercure détectée dans les poussières.

La problématique du mercure suscite déjà depuis de nombreuses années un grand intérêt dans le domaine du laboratoire et de nombreux constructeurs en instrumentation analytique (Perkin Elmer, Cetac Technologies, Leemans Labs, PS Analytical, Tekran, Asoma) tentent de répondre à la demande de systèmes toujours plus performants, et de plus en plus automatisés. Certains proposent des adaptations de l'instrumentation traditionnelle sous forme d'accessoires, d'autres développent une instrumentation spécialement conçue pour la détection du mercure. La technique d'analyse la plus rependue pour la détection de traces de mercure reste la SAA, largement employée et souvent recommandée (NIOSH, OSHA, MDHS). Différentes variantes de cette méthode existent selon le type d'appareillage utilisé, mais toute reposent sur le même principe : la mesure de l'absorption d'un faisceau lumineux, caractéristique de l'élément à analyser, par l'échantillon pulvérisé sous forme de vapeurs atomiques[304]. Un spectromètre d'absorption atomique est généralement constitué d'une source lumineuse (émission d'un rayonnement constitué de raies très intenses et très fines), d'un nébuliseur (pulvérisation), d'un brûleur (atomisation), d'un monochromateur et d'un détecteur[305]. Dans le cas de l'analyse du mercure, la source lumineuse est constituée d'une lampe à anode de mercure ou d'une lampe à décharge. Le nébuliseur d'un spectromètre d'absorption atomique est généralement équipé d'un capillaire permettant d'aspirer la solution à analyser et d'une valve dont le rôle est de pulvériser l'échantillon dans la chambre d'atomisation (brûleur). Ce procédé peut être remplacé par un autre système appelé génération d'hydrure, généralement employé pour les analyses de mercure et autres éléments métalliques susceptibles de former des hydrures (As, Se, Sb, Te, Bi, Sn)[306]. Ce procédé consiste en l'utilisation d'un appareil manuel et d'un ensemble constitué d'une cellule en

[300] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 2002, p3

[301] INTERNET[17]

[302] INTERNET[18]

[303] GUILLOT, 1996

[304] FLORÉAL

[305] FLORÉAL

[306] INTERNET[19]

quartz, directement alignée sur la source lumineuse du spectromètre. L'appareil développé par Perkin Elmer® (MHS-15 Mercury/Hydride system) est une bonne illustration de ce procédé (fig.10). Connecté au spectromètre, ce dernier comporte un flacon pour la solution à analyser, un réservoir contenant un réactif et le système pneumatique permettant le mélange des solutions ainsi que leur transport jusqu'à la cellule en quartz.

Fig.10 - Appareil pour génération d'hydrure MHS-15 Mercury/Hydride system de chez Perkin Elmer® [307]

Une fois le spectromètre calibré, le mercure présent dans la solution à analyser (échantillon, acide nitrique, acide chlorhydrique et eau deionisée), sous forme ionique (Hg^{2+}), doit être réduit en mercure élémentaire (Hg°) avant d'être injecté dans la chambre d'atomisation. Dans la méthode classique, ceci est réalisé par l'adjonction d'une petite quantité (5mL) d'une solution de chlorure stanneux ($SnCl_2$) à 10% avant de procéder à l'analyse. Dans la technique par génération d'hydrure (fig.10), la réaction de réduction se fait automatiquement par le mélange, à l'aide du système pneumatique, de la solution à analyser et de la solution réductrice à base de borohydrure de sodium ($NaBH_4$) et d'eau deionisée: $Hg^{2+} + 2NaBH_4 + 6H_2O \rightarrow Hg° + 2Na^+ + 2H_3BO_3 + 7H_2$. Ce mélange est ensuite transporté jusqu'à la cellule de quartz par la libération d'hydrogène et l'utilisation d'un courant d'argon.

D'autres méthodes d'analyses telles que la spectroscopie de fluorescence atomique (SFA), la chromatographie en phase gaseuse (CPG) et la fluorescence-X à dispersion d'énergie (EDXRF) peuvent également être employées pour la détection de traces de mercure.

2.6.3 GESTION D'ACCIDENT

De nos jours, les accidents les plus fréquents et les plus rependus, liés à l'utilisation de mercure, sont dus à des cas de déversement de plus au moins grandes quantités de métal. Comme nous l'avons vu

[307] INTERNET[20]

(section. 2.4.2.1), une décontamination de ce genre peut être complexe (billes liquides et divisibles) et engendrer des coûts importants. Le but n'est pas ici de donner les directives précises sur les étapes à suivre pour la réussite d'une décontamination – de nombreuses publications le font – mais de voir qu'elle est l'approche et quel est le comportement à adopter en cas d'accident. La première chose à prendre en compte est la quantité de mercure déversée et la nature de la zone concernée, car ceci permet de décider si le travail de décontamination peut être réalisé par le responsable de l'accident. Généralement, une quantité supérieure au contenu d'un thermomètre médical (0.5 à 3g) doit être décontaminée par une entreprise spécialisée. Dans certains pays (Etats-Unis), un déversement de cette envergure dans un endroit tel qu'une manufacture ou une école, doit être reporté, selon la loi fédérale, aux autorités compétentes[308]. La nature de la zone du déversement (sols lisse ou poreux, présence de tapis ou moquette, etc.) est également un facteur important à prendre en compte lors de l'évaluation d'un travail de décontamination d'un déversement de mercure métallique. Avant de procéder à toute intervention, la ou les personnes impliquées devraient être informées sur les dangers du mercure ainsi que la manière de procéder à une décontamination. Ces informations sont mises en ligne (Internet) par de nombreuses organisations spécialisées dans le domaine de l'environnement ou de la santé publique (IDEM, NEWMOA, DEQ, EPA, CTQ) qui donnent les démarches précises pour réaliser une décontamination. Il est souvent recommandé de commencer par évacuer et délimiter la zone contaminée, afin de restreindre l'accès et d'éviter ainsi que la contamination ne s'étende (semelles de chaussures, habits, etc.). Certaines interventions, comme l'utilisation d'un aspirateur, sont à proscrire absolument. Ceci ne ferait qu'empirer la situation (vaporisation et pulvérisation du mercure et contamination de l'appareil)[309]. L'utilisation de certains outils tels que des pinceaux ou des balais est également déconseillée, car cela provoquerait la division du mercure en particules microscopiques[310]. Les résidus de mercure et tout objet mis en contact avec ce dernier doivent être éliminés en tant que déchets contaminés (jamais dans les ordures ménagères). L'emploi de matériel adéquat, peut énormément faciliter la décontamination d'un déversement de mercure. L'utilisation d'une bonne source lumineuse, directement dirigée sur la zone du déversement, permet de faciliter la visualisation des billes de mercure, même de petites dimensions. Des seringues (avec ou sans aiguille), des feuilles de papier ainsi que du ruban adhésif sont de bons moyens pour le ramassage du mercure déversé. Enfin, le recours à de la poudre de zinc, de soufre ou de produits d'amalgamation commerciaux tel que Mercurisorb® (Roth) permet, par liaison chimique et amalgamation, de faciliter le ramassage des particules de mercure[311].

[308] NEWMOA, 2003

[309] MAP & IDEM, 2002

[310] MAP & IDEM, 2002

[311] NEWMOA, 2003

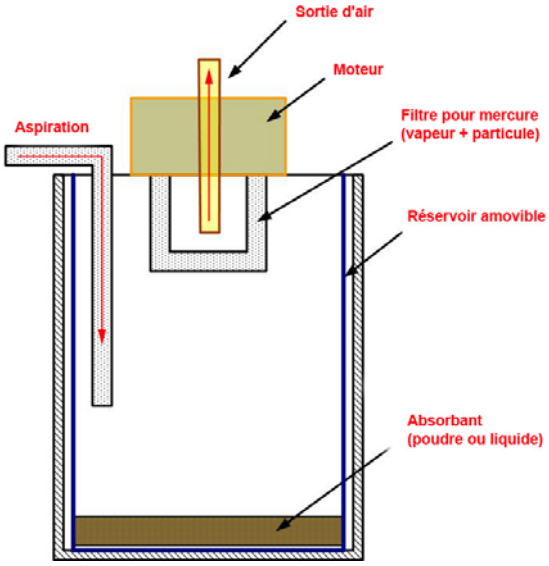


Fig.11 - Aspirateur pour mercure Nilfisk-Advance [312]

Fig.12 - Schéma représentant un exemple de construction pour aspirateur à mercure [313]

Il existe également des aspirateurs (fig.11), équipés de filtres (charbons actifs imprégnés), spécialement conçus pour le mercure (Nilfisk-Advance), mais il est généralement difficile de se les procurer (distributeurs, prix élevés). Les aspirateurs d'emploi personnel ou adapté à partir d'appareils communs devraient toujours comporter comme éléments principaux : un réservoir jetable ou facilement nettoyable, un produit absorbant (poudre, liquide) dans le réservoir pour éviter la libération de vapeurs ainsi qu'un filtre placé à la sortie d'air pour éliminer le mercure sous forme de vapeur et de particules (fig.12). Une décontamination devrait toujours être suivie par un contrôle qui peut être réalisé par diverses méthodes. La vérification de l'inexistence de résidus de mercure peut être entreprise à l'aide d'une lampe torche et d'une loupe (3 à 10x) ou en saupoudrant la zone décontaminée à l'aide d'un produit permettant l'identification des billes de mercure résiduelles (Mercury Indicator® - J.T. Backer). Le succès d'une décontamination est également vérifié en contrôlant le niveau de concentration de vapeur de mercure dans l'air à l'aide des diverses méthodes d'analyses existantes (section 2.6.2). Ce type de contrôle demande une marche à suivre minutieuse et un protocole d'évaluation a été publié, dans ce but, par le centre toxicologique de l'INSPQ [314].

[312] INTERNET[21]

[313] WILHELM MARK (MTS)

[314] GUILLOT, 1996[2]

3 LE MERCURE DANS LES MUSEES

3.1 LES COLLECTIONS

3.1.1 TYPES DE COLLECTIONS – IDENTIFICATION ET EVALUATION DES RISQUES

Ce travail porte essentiellement sur le patrimoine technique et industriel. C'est donc autour de ce dernier que la réflexion relative au mercure est menée dans ce chapitre. Il convient néanmoins de connaître les autres sources potentielles de mercure dans les musées et d'avoir une vision globale sur les recherches déjà effectuées dans ce secteur. Sur la base des données établies dans le précédent chapitre consacré aux propriétés et applications techniques du mercure, nous exposons ici les problématiques rencontrées dans un musée ainsi que les méthodes de gestion jugées appropriées.

3.1.1.1 Patrimoine technique et industriel

Indépendamment du type de collection, tout musée technique ou industriel peut posséder de l'instrumentation et/ou de l'appareillage comportant du mercure : en tant qu'objet à part entière ou sous forme de composante d'un objet. Certains types de collections sont néanmoins susceptibles de contenir plus fréquemment ce type d'objet et en plus grande quantité. C'est le cas des collections scientifiques où on trouve généralement un grand nombre de thermomètres, baromètres et toute sorte d'instruments liés au domaine de l'expérimentation susceptibles de comporter du mercure – matériau largement employé dans le domaine de la recherche et du laboratoire. Dans les collections liées aux transports électriques (trams, trolleybus), le mercure peut également être présent en grandes quantités, sous la forme de redresseurs à vapeur de mercure (sujet étudié dans les détails dans le chap.4). D'autres objets plutôt rares mais pouvant contenir des très grandes quantités de mercure sont les phares (navigation) ainsi que les télescopes à miroir liquide.

Le mercure peut également être présent dans divers types d'installations industrielles reconverties ou préservées dans lesquelles ce dernier joue un rôle direct (extraction de mercure, production de mercure, production de chlore et de soude caustique, production d'instruments comportant du mercure) ou est présent en tant que polluant (usines électriques, raffinage du pétrole, etc.). La mine d'Idrija (Yougoslavie), devenue musée en 1953, est un bon exemple de reconversion d'une mine d'exploitation de mercure[315,316]. Etant donné la cessation d'activité de la plupart des mines de mercure, on peut s'attendre à une multiplication de ce type de situation.

Afin d'identifier les problématiques posées par la présence de mercure dans un musée, il convient d'avoir une idée des matériaux constitutifs de ce type de collections et plus particulièrement de ceux qui entrent directement en contact avec le mercure. Généralement, le mercure contenu dans un appareil ou instrument se trouve enfermé dans une enceinte qui est la plupart du temps hermétique. Etant donné l'incompatibilité du mercure vis-à-vis de nombreux matériaux (principalement certains

[315] LESKOVEC, 2004

[316] ZELENC, 2004

métaux), ceux-ci ne sont pas d'une grande variété lorsqu'il s'agit de l'élément servant de contenant. La plupart du temps, ce dernier est constitué de verre (thermomètre, baromètre, redresseur à ampoules de verre, interrupteur à bascule, etc.) ou d'un métal compatible (redresseur à cuve métallique). Les métaux que l'on retrouve le plus fréquemment sont des alliages à base de fer (aciers), mais le nickel, le molybdène et le tungstène, qui ont également une bonne résistance chimique au mercure, ont également été employés. Plus rarement, on pourra trouver d'autres métaux communs (alliages à base de cuivre), mais revêtu d'un métal ne réagissant pas avec le mercure. Malgré le fait que le verre et certains alliages métalliques représentent les rares matériaux employés dans ce domaine, il existe de nombreuses variantes selon la constitution spécifique de ces derniers. D'une manière générale, on peut dire que la résistance du matériau employé est dépendante de l'époque de fabrication.

Les verres et les alliages utilisés pour l'instrumentation comportant du mercure ont été spécialement développés et améliorés (tout au long de leur utilisation) pour résister à des contraintes spécifiques. La date de fabrication de l'objet est généralement un bon indice et devrait, dans de nombreux cas, permettre une évaluation approximative du type de verre ou de l'alliage employé. Dans le domaine des verres dit « techniques » (employés pour la fabrication d'instrumentation), l'utilisation de l'oxyde de Bore (B_2O_3) à partir du 18e siècle a représenté une réelle avancée quant à l'amélioration de la tenue chimique des verres. En fait, les verres peuvent être classés en deux grandes catégories : les verres issus du système Na_2O – CaO – SiO_2 et les verres qui découlent du système Na_2O – B_2O_3 – SiO_2, dit verres borosilicatés. D'autres éléments d'addition, ajoutés en petites quantités à ces deux systèmes, peuvent modifier les propriétés du verre. La constitution d'un verre technique est donc spécifiquement choisie en fonction du type d'application envisagée. A côté de la résistance chimique, la résistance à l'expansion thermique (inversement proportionnelle au coefficient de dilatation thermique) est une des caractéristiques les plus communes à ces types de verre[317]. A titre d'exemple, les verres utilisés pour la fabrication de l'appareillage électrique, dans lesquels interviennent d'autres matériaux (céramique, métal) et ou il est indispensable d'assurer une parfaite isolation entre les divers éléments d'assemblage, possèdent généralement un faible coefficient de dilatation thermique. Par ailleurs, les verres utilisés pour la fabrication d'instruments de mesure (thermomètres, baromètres), où les variations de dimensions dues aux fluctuations de températures doivent être minimes, répondent également au même type d'exigence[318]. Les variantes de composition que l'on peut retrouver dans la fabrication de ces types de verre sont innombrables et il est impossible de faire ici un inventaire de tous les types de verres employés. Ces informations existent néanmoins et des ouvrages techniques tels que celui de Volf M. B.[319] et Partridge J. H.[320] ou des publications spécifiques aux constructeurs permettent d'avoir accès à des informations plus au moins précises sur le type de verre concerné.

[317] VOLF, 1961, p41

[318] VOLF, 1961, p41

[319] VOLF, 1961

[320] PARTRIDGE, 1949

Ceci s'applique également aux alliages métalliques employés dans le domaine de l'appareillage comportant du mercure.

La consultation des quelques publications traitant de la problématique du mercure dans les collections du patrimoine technique et industriel semble montrer qu'à part les aspects purement techniques décrits ci-dessus les connaissances dans le domaine sont très limitées. Souvent on se contente de mentionner les éventuels risques sans traiter le problème dans toute sa globalité[321,322,323].

3.1.1.2 Autres types de patrimoines

En dehors des collections techniques et industrielles, la problématique du mercure est rencontrée au sein des collections d'histoire naturelle, de botanique, de minéralogie, de pharmacie, d'art, mais également d'ethnographie et d'archéologie. Une des principales sources responsables de la présence de mercure dans ces collections semble être l'utilisation antérieure (à partir du 18e siècle) de pesticides et biocides produits à base de composés de mercure (chlorure mercurique - $HgCl_2$)[324]. Ces substances ont largement été employées dans le domaine de la taxidermie et de la botanique (prévention d'infestations d'insectes et de bactéries), mais également dans le domaine de l'anthropologie. Cette problématique a été largement étudiée par divers auteurs tels que Catharine Hawks et al[325], P, Jane Sirois[326] et Geneviève Sansoucy[327], Christine Found et Kate Helwig[328], Robert Waller et al[329], Palmer Peter T.[330] et Purewal Victoria[331]. Ces articles sont principalement basés sur la description de techniques (spot tests et analyses) pour la détection de pesticides contenant du mercure. Le mercure et/ou ses composés peuvent également constituer en partie ou en totalité l'objet conservé. C'est le cas de certains minéraux dans lesquels le mercure est présent (voir annexe 1), d'objets décorés à base de cinabre (HgS) ou d'autres composés du mercure (collection ethnographiques, archéologiques et artistiques) ou des collections pharmaceutiques comprenant des produits élaborés à base de mercure[332,333]. De part sa nature particulière (état liquide à température ambiante et aspect métallique), le mercure peut également avoir été employé dans le domaine des objets d'art. La fontaine de mercure de la fondation Miro en est un bon exemple.

---

[321] ICC, 2002
[322] FLINN, 2002
[323] BARCLAY, 2001
[324] SIROIS, 2001
[325] HAWKS CATHARINE, 2004
[326] SIROIS, 2001
[327] SIROIS, 2001
[328] FOUN & HELWIG, 1995
[329] WALLER ET AL, 2000
[330] PALMER, 2001
[331] PUREWAL, 2001
[332] SIROIS, 2001
[333] FLINN, 2002

3.1.1.3 Identification et évaluation des risques

L'identification du risque consiste, premièrement, au repérage de tout objet contenant ou susceptible de contenir du mercure. Cette étape peut être réalisée visuellement (présence de mercure métallique) mais également sur la base de la documentation existante (manuels d'entretiens, ouvrages techniques, etc.) sur l'objet en question. L'identification ne se résout pas uniquement à la présence de mercure, mais également à la quantification de ce dernier: quantité que contient chaque objet et quantité totale présente dans le musée. Lorsque les quantités de mercure sont importantes et/ou que l'état de conservation des objets en question est jugé (a première vue) insuffisante, il peut s'avérer nécessaire de réaliser des analyses de concentration en vapeurs de mercure dans l'air (section 2.6.2). Ceci permet d'évaluer les conditions environnementales de la réserve ou de la salle d'exposition et de définir si la présence des objets comportant du mercure représente ou non un risque imminent pour la santé humaine. Dans le cas de la détection de concentrations supérieures aux normes en vigueur (section 2.5.2.3), les précautions personnelles nécessaires doivent être prises (section 2.6.1.3) avant de poursuivre toute investigation. Il est important également de bien repérer l'emplacement des objets identifiés comme contenant du mercure. Une fois ces objets identifiés et les conditions environnementales considérées comme sûres, ces derniers doivent faire l'objet d'un travail d'observation minutieux permettant de déterminer la nature et l'état de conservation des matériaux les constituant.

Une attention toute particulière doit être apportée au contenant du mercure, et à la structure permettant son soutien. L'importance du risque engendré par la présence de mercure dépend directement de l'état de conservation des matériaux constituant ces éléments. D'une manière générale ces derniers doivent être considérés comme fragilisés et ne remplissant plus forcément leur rôle initial (altération naturelle, accidentelle, fonctionnelle) par le simple fait que les objets présents dans un musée sont anciens. De plus, chaque objet se trouve dans un état de conservation spécifique à sa période d'utilisation, ses lieux de stockages, etc. Les objets identifiés comme contenant du mercure devraient donc être inspectés dans le détail et traités en première priorité. L'état de conservation du mercure doit également être contrôlé, car ce dernier pourrait être responsable (avec le temps) de la formation de composés de mercure qui représentent des risques spécifiques[334]. Certains polluants communément présents dans les musées tels que l'oxygène (O_2), l'ozone (O_3), le peroxyde d'azote (NO_2) et le sulfure d'hydrogène (H_2S) possèdent des affinités avec le mercure (voir chap. 2.2). Le risque varie également en fonction des types de matériaux constitutifs de l'objet. Par exemple, le point faible d'un contenant en verre, généralement stable chimiquement, est lié à sa fragilité mécanique (rupture), alors que les problématiques liées à un contenant en alliage métallique (mécaniquement résistant) sont davantage liées à l'altération chimique (corrosion). La connaissance de la constitution des matériaux peut apporter également une aide précieuse pour l'évaluation des éventuels processus de dégradation (chimique, mécanique) futurs. La présence de quantités importantes de poussières sur des objets contenant du mercure peut également être une source de pollution et ces dernières devraient faire l'objet d'observations régulières (œil nu, loupe,

[334] ICC, 2002, p2

microscope)[335]. En effet, dans le cas où celles-ci datent d'une période antérieure à l'arrivée de l'objet dans la réserve du musée, elles pourraient être associées à du mercure (sous forme de billes difficilement visibles) issu d'un accident lié à la période de fonctionnement de l'appareil. Les objets fabriqués de manière à ce que le mercure ne soit pas contenu dans un élément hermétique doivent être considérés comme particulièrement dangereux et des mesures sont nécessaires pour éviter l'exposition directe du mercure à l'atmosphère. Par définition, tout objet contenant du mercure représente un risque potentiel pour un musée. Ce risque peut être indirecte et plus au moins important en fonction du type de matériaux existants et de leurs états de dégradation. Il peut être également imminent dans le cas ou les matériaux en contact avec le mercure ne rempliraient plus leur rôle isolant.

3.1.2 PROBLEMATIQUES DE CONSERVATION-RESTAURATION – GESTION DES RISQUES

L'existence d'objets contenant du mercure constitue donc un risque potentiel non négligeable pour le personnel des musées, le public ainsi que l'environnement. Ce risque ne pourra jamais être complètement éliminé tant que du mercure persiste dans les collections. La prévention reste donc le seul moyen permettant de minimiser les risques liés au mercure dans les musées. Toute institution comportant de l'appareillage et de l'instrumentation contenant du mercure devrait donc être consciente du danger qu'ils peuvent représenter (identification et évaluation du risque). Cette prise de conscience se fait au travers du travail d'observation et de réflexion cité dans le chapitre précédent, mais également par la connaissance des caractéristiques toxicologiques du mercure, des risques que ce matériau représente pour l'être humain ainsi que des recommandations et réglementations existantes (chap. 2.4 et 2.6). Le comportement à adopter en cas d'accident lié à un déversement de mercure est également un aspect qu'il convient de connaître. Toutes ces informations devraient faire l'objet d'une base de données, spécifiquement développée pour les objets à risque qui serait disponible pour toute personne directement impliquée dans la manipulation ou ayant accès aux locaux de stockage.

Indépendamment des risques potentiels concernant le mercure, chaque objet concerné comporte ses propres problématiques (matériaux, forme, volume, poids, fragilité) qui peuvent, comme nous l'avons vu, sensiblement faire varier l'importance du danger lié à la présence de mercure. Il est donc nécessaire de développer une documentation propre à chaque objet comportant les informations suivantes :

- Description sommaire de l'appareillage ou de l'ensemble (construction, schémas, etc.) ;
- Identification des risques directement liés à l'objet (matériaux, état de conservation, etc.) ;
- Recommandations relatives au stockage (environnement, accès, identification) ;
- Précautions concernant la manipulation (protection personnelle, méthode de transport) ;
- Méthodes pour le travail de restauration (protection personnelle, matériel approprié, contrôle) ;
- Plan d'urgence en cas d'accident (matériel, personnes et organismes compétents).

[335] GUILLOT, 1966

La mise en place de directives particulières concernant le stockage permet de réduire les cas d'accident et ainsi de minimiser les risques de contamination des lieux. Les objectifs principaux concernant le stockage de ce type d'objets, consiste à créer un confinement permettant de les isoler des risques potentiels liés à l'homme et à l'environnement. Ceci en agissant sur l'objet, sur son environnement de stockage, mais également sur l'existence d'informations relatives aux dangers potentiels. Dans un premier temps les objets contenant du mercure devraient être identifiés à l'aide de panneaux compréhensibles de tous qui permettraient de signaler la présence de mercure à toute personne entrant dans la réserve, qu'elle fasse partie du personnel du musée ou d'une équipe de secours intervenue à la suite d'un sinistre (incendie, tremblement de terre, etc.). Ces panneaux devraient également contenir une indication permettant de prendre connaissance de la documentation existante sur les objets concernés et de son emplacement dans la base de données du musée. Tout objet de petite dimension devrait être stocké dans une boîte de protection permettant de le protéger des éventuels chocs et vibrations pouvant entraîner sa rupture. Les objets de grandes dimensions comportant du mercure, pour lesquels il n'est pas forcément envisageable de fabriquer une boîte de protection, doivent être entreposés dans un emplacement approprié : celui qui entrave le moins les mouvements fréquents (défini par l'organisation de la réserve) du personnel et qui limitera au maximum les déplacements de l'objet en question. Ce type d'appareillage peut également être protégé par la mise en place de structures de renforts sur les parties les plus sensibles, afin de restreindre les risques d'accident liés à d'éventuels chocs ou au simple affaissement de l'objet. La mise en place de bacs de rétention en dessous de l'objet permet également de faciliter la récupération du mercure en cas de déversement accidentel (fuite, rupture). La présence de mercure doit également être clairement signalée sur la boîte comportant l'objet ou directement sur l'objet lorsqu'il est de grandes dimensions. Cette indication doit être visible de loin et indiquer clairement la présence de mercure, ainsi que les principales informations sur les dangers et les précautions à prendre concernant l'objet en question (risque d'implosion, fragile, éviter tout mouvement brusque ou choc, maintenir en position verticale, etc.). Lorsque le mercure présent dans l'objet n'est plus confiné (fuite, rupture), les interventions nécessaires doivent être entreprises pour rendre le contenant étanche, et si cela n'est pas possible, le mercure devrait être éliminé et stocké dans des récipients conformes à la norme (section 2.6.1.1). Cette dernière intervention ne doit cependant pas être prise à la légère, car elle engendre l'élimination d'un élément essentiel à la lecture de l'objet (section. 3.2.1). De plus, l'élimination du mercure ne permet pas une décontamination complète de l'objet et nécessite l'utilisation de protections personnelles (section 2.6.1.3).

Tout objet engendre des précautions de manipulation spécifiquement liées à ses caractéristiques. Ces précautions sont d'autant plus importantes lorsque cet objet comporte une substance toxique comme le mercure. La meilleure façon d'éviter un accident est de limiter au strict nécessaire les déplacements de l'objet. Ensuite, des directives spécifiquement adaptées à l'objet en question (matériaux, dimensions, poids, etc.) et à son état de conservation (fragilité) devraient être développées pour la manipulation. Celles-ci peuvent comporter des informations telles que : techniques de levage, moyens de transport, positions à respecter, etc. Des précautions particulières (emballage, moyen de

locomotion, conduite à adopter, etc.) doivent également être prises lors du transport d'appareillage contenant du mercure sur de longues distances. En effet, ce genre de déplacements augmente considérablement le risque d'accident (fragilisation de l'objet ou déversement de mercure). De plus, le transport de matières toxiques, y compris le mercure, est réglementé par la législation sur le transport des matières dangereuses (voir section 2.5.2.2). Les personnes responsables de la manipulation et du transport de tout objet contenant du mercure devraient êtres informées sur ces lois ainsi que sur les précautions et les dangers existant.

Un travail de restauration sur de l'appareillage comportant du mercure engendre également des précautions spécifiques. Le personnel impliqué dans l'intervention devrait toujours être informé (documentation spécifique de la base de données) des risques et des précautions à adopter par rapport au mercure. Une bonne connaissance technique de l'objet est également nécessaire: matériaux et leurs problématiques, manipulations spécifiques, manipulations dangereuses ou à éviter, conséquences de ces dernières, quantités de mercure présentes, etc. Les manuels d'entretien, les ouvrages techniques spécifiques et les techniciens ayant travaillé sur ces objets constituent une source pouvant apporter une partie de ces informations. Toute manipulation inutile devrait être évitée : plus l'intervention pratique sur l'objet est importante, plus le risque d'accident est grand. Lorsqu'une intervention est vraiment nécessaire, l'ensemble du groupe de travail devrait connaître les conséquences possibles (rupture, déversement, etc.) de cette manipulation et réfléchir à la meilleure manière d'agir. Quand une intervention implique un groupe de personnes, cette dernière devrait toujours être discutée avant de procéder au travail et la décision finale revient à la personne de référence. L'espace aménagé pour l'intervention devrait permettre au personnel de se déplacer librement autour de l'appareil, afin d'avoir une vue d'ensemble de l'objet et d'éviter tout contact imprévu pouvant être la cause d'un accident. Le travail devrait toujours être effectué au-dessus d'un bac de rétention (bac, plastique) dont le volume est supérieur à la quantité de mercure présente dans l'objet. L'intervention sur de l'appareillage contenant du mercure nécessite la présence (sur les lieux de travail) de matériel approprié : kit de protection personnelle contre le mercure et ses vapeurs (voir section 2.6.1.3) et kit de décontamination (section 2.6.3). Dans le cas où l'intervention implique la manipulation de mercure, le matériel de protection personnelle devrait être porté par toute personne impliquée et une bonne aération du local est nécessaire. Dans tous les cas d'intervention lourde (démontage de certains éléments) et particulièrement lorsque le mercure est mis à l'air libre, des contrôles réguliers des conditions atmosphériques (mesure de concentration de vapeurs de mercure dans l'air) sont nécessaires (voir section 2.6.2). Lorsque l'analyse démontre une situation non conforme à la norme (voir section 2.5.2.3), le travail de restauration ne devrait être poursuivi qu'avec l'utilisation du matériel de protection personnelle ou après la décontamination des locaux (aération, élimination de potentiels résidus de mercure dispersés). Dans le cas d'un déversement de mercure dans le bac de rétention, le port du matériel de protection personnelle est nécessaire pour effectuer la récupération du métal. Dans le cas où le déversement a lieu dans une zone extérieure au bac de rétention, les conséquences peuvent être graves et le comportement à adopter doit être adapté à la situation (voir chap. 2.6.3).

3.2 DEONTOLOGIE ET LEGISLATION

3.2.1 DE LA NECESSITE DE CONSERVER LE MERCURE DANS LES COLLECTIONS

Bien que la plupart des appareils et instruments comportant du mercure perdent leur fonction une fois stockés ou exposés dans un musée, la présence du mercure joue un rôle très important, non seulement pour la compréhension de leur principe de fonctionnement, mais également leur l'aspect visuel. Un thermomètre vidé de son mercure n'est plus qu'un tube en verre muni d'une graduation et devient un objet dont la lecture est très difficile. On comprend bien que la présence de mercure dans un musée implique des interventions de conservation préventive spécifiques (temps, argent) et représente un risque supplémentaire. De plus, dans certaines conditions où l'objet n'est pas hermétique (construction, fuite, rupture), la présence de mercure pose un risque direct pour la santé humaine. Ces raisons constituent également des arguments pour l'élimination du mercure de l'objet. Pour les raisons citées ci-dessus, ce type d'intervention ne doit pas être pris à la légère, mais seulement envisagé après s'être posé les questions suivantes :

- N'existe t'il pas d'autres moyens d'éliminer le risque causé par la présence de mercure ?
- L'élimination du mercure provoque t'il un changement de l'aspect visuel de l'objet (dans le cas ou le contenant n'est pas en verre, le mercure est invisible) ?
- L'objet concerné est-t-il une pièce unique ou existe-t-il plusieurs exemplaires ?
- Quels moyens de substitution sont envisageables pour cet objet ?

Dans le cas où l'élimination du mercure ne peut être évitée, il existe diverses solutions de remplacement, selon le type d'objet, permettant de garder un aspect esthétique proche de l'original. A titre d'exemple, le mercure de la tige d'un thermomètre peut être remplacé par un mince fil de platine ou d'étain[336]. D'autres matériaux proches de l'aspect du mercure peuvent être employés comme substituts: mince couche d'argent ou d'aluminium déposée par des méthodes chimiques (dépôt chimique en phase vapeur), disques d'aluminium poli et miroirs[337].

3.2.2 APPLICATION DE LA LEGISLATION DANS LES MUSEES

La législation relative au mercure (voir section 2.5.2) ne semble pas poser de problèmes en ce qui concerne l'existence de l'instrumentation et de l'appareillage en contenant dans les musées. En effet, la législation s'applique essentiellement au commerce du mercure et de l'instrumentation en contenant (interdiction de vente, d'exportation ou d'importation) et la possession n'est pas illégale. Même les législations les plus strictes en matière de mercure (Pays-Bas, Danemark et Suède) possèdent des clauses de non application de la législation qui peuvent être prises en considération pour un musée. La législation concernant le transport des substances dangereuses, que l'on retrouve dans la plupart des pays, pourrait éventuellement être appliquée à l'instrumentation comportant du mercure, mais ici encore, cette législation concerne le transport destiné au commerce ou à des grandes quantités de

[336] ICC, 2002, p3

[337] ICC, 2002, p3

mercure. Le transport de grandes quantités d'objets contenant du mercure ou d'objets contenant de grandes quantités de mercure peut, par contre, être assujetti aux normes nationales ou européennes réglementant l'identification des transports (camion) contenant de telles charges.

De nombreux organismes nationaux et parfois internationaux émettent des directives (réglementations, recommandations) relatives à la protection des personnes sur les lieux de travail. On trouve généralement dans les dénominations de ces organismes, des termes tels que « santé et sécurité au travail », « santé publique », etc. Un certain nombre d'entre eux sont répertoriés dans l'annexe 4. Leur objectif principal est la promotion de la santé et de la sécurité dans le domaine professionnel et/ou public, où la gestion des substances dangereuses constitue un thème récurent. Certaines des directives émises sont considérées comme des recommandations, d'autres constituent des réglementations reconnues juridiquement. Ces recommandations et réglementations sont directement applicables à un musée technique et industriel et plus spécifiquement à la problématique du mercure. En effet, un musée comprend l'activité de personnes dont la santé peut être mise en danger et le mercure est reconnu comme étant une substance dangereuse. Tout musée concerné par cette problématique devrait donc s'informer auprès des organismes existant dans son pays et/ou sa juridiction et appliquer les directives qu'il juge nécessaire pour assurer la sécurité de son personnel.

Dans la réalité du domaine muséal, la gestion de la problématique du mercure doit être menée en prenant en considération le rôle d'un musée ainsi que ses obligations vis-à-vis de la législation et des recommandations relatives à la sécurité et à la santé publique et de l'éthique de la conservation.

4 ETUDE DE CAS : REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE

Les chapitres précédents ont permis d'étudier, d'une manière générale, les problématiques de conservation que peuvent poser les appareillages contenant du mercure. Le cas spécifique des redresseurs à ampoules de verre du musée de l'industrie de Porto est maintenant l'occasion de réaliser un travail d'investigation plus approfondi sur ce genre de matériel. Ce cas d'étude permet de mettre en pratique les recherches élaborées précédemment concernant les problématiques que posent le mercure. Celles-ci seront plus particulièrement appliquées aux redresseurs à vapeur de mercure. La première partie de ce chapitre porte sur l'historique technique de ces appareillages, puis l'historique de la marque des redresseurs du musée de l'industrie ainsi que sur le contexte historique de leur utilisation à Porto. L'étude de leurs caractéristiques techniques permet ensuite d'identifier le type de redresseur concerné et d'apporter des informations utiles à leur conservation (matériaux, constitutions, etc.). Finalement, une approche plus pratique permet d'appliquer la théorie développée dans le chap. 3.1 sur l'identification, l'évaluation et la gestion du risque lié à la présence de mercure dans les collections du patrimoine technique et industriel.

4.1 HISTORIQUE TECHNIQUE DES REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE

4.1.1 DEFINITION

Avant d'aborder spécifiquement le redresseur à vapeur de mercure, il convient de faire une brève définition de ce que représente un redresseur dans le domaine de l'électrotechnique. Cette explication permettra, sans rentrer dans les détails de tel ou tel type de redresseur, d'illustrer la fonction et les bases du principe de fonctionnement de cet élément dans un circuit électrique. Un redresseur est, par définition, un élément à deux bornes qui possède la propriété de laisser passer le courant électrique lorsqu'il circule dans un sens et de l'empêcher de passer lorsqu'il tend à circuler dans l'autre sens[338]. Il peut être simplement représenté comme l'élément Red selon la fig.13. Cette dernière représente un circuit électrique simple, composé d'une source de courant alternatif monophasé AC, d'un transformateur T et d'une résistance R. La courbe caractéristique de l'allure du courant alternatif qui traverse ce circuit entre A et B est représentée sur la fig.14 : l'abscisse représente la tension et l'ordonnée le temps, où le point T correspond à une période. On peut remarquer que pendant l'intervalle de temps d'une période, la tension électrique part d'une valeur nulle, atteint une tension maximale positive, repasse par le point nul, passe par une valeur maximum négative et se termine à une valeur nulle. Ceci correspond à la représentation du comportement d'un courant alternatif. En reprenant la fig.13, ce courant circule de A vers B (dans le sens de la flèche) lors d'une alternance positive et de B vers A lors d'une alternance négative. En plaçant un redresseur Red dans ce circuit, le courant peut circuler normalement de A vers B, mais se trouve bloqué dans le sens inverse. La courbe caractéristique (fig.15a) de ce montage montre qu'une tension est mesurable uniquement lors d'une alternance positive et que le résultat est un courant unidirectionnel et périodique[339]. Dans l'application pratique, on cherche à obtenir un courant unidirectionnel et continu (fig.15b), en employant des procédés qui varient selon l'appareillage, mais qui utilisent généralement plusieurs éléments redresseurs dans un même circuit.

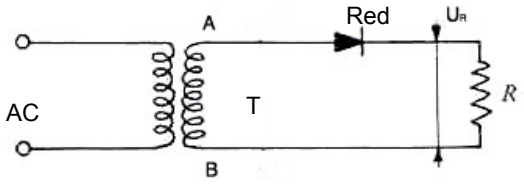


Fig.13 – Redresseur dans un circuit simple [340]

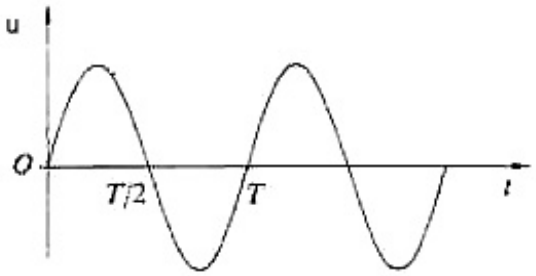


Fig.14 – Courbe caractéristique d'un courant alternatif [341]

[338] POLOUJADOFF, 1969, p119

[339] POLOUJADOFF, 1969, p122

[340] POLOUJADOFF, 1969, p122

[341] POLOUJADOFF, 1969, p122

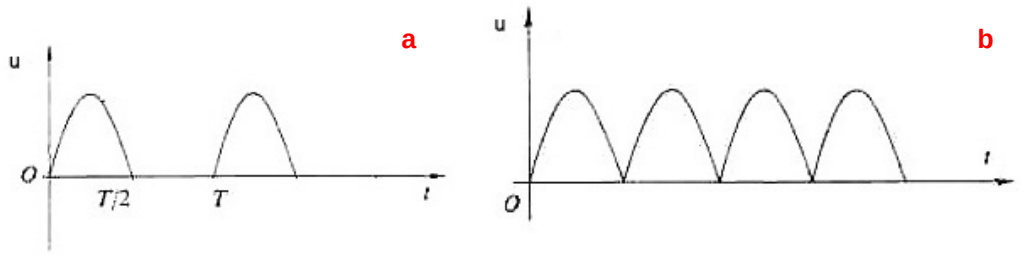


Fig.15 – Allures d'un courant unidirectionnelle périodique (a) et continu (b) [342]

Cette explication permet d'illustrer, d'une manière simplifiée, la fonction d'un redresseur qui est de convertir le courant alternatif en courant continu. Même si dans la réalité les montages sont plus compliqués, car ils utilisent des courants triphasés et hexaphasés. Le but de cette transformation est d'alimenter certains appareils fonctionnant à l'aide de courant continu tout en pouvant transporter le courant sous sa forme alternative. En effet, le transport du courant électrique est plus pratique sous sa forme alternative que sous sa forme continue.

4.1.2 DONNEES HISTORIQUES

L'invention du redresseur à vapeur de mercure revient à M. Cooper Hewitt, qui présenta en 1901, sont premier appareil à ampoule de verre à l'université de Columbia. L'historique du travail effectué par M. Cooper Hewitt étant déjà traité dans le chapitre 4.2 (cas d'étude pratique de ce travail), nous ne reviendrons pas ici sur les détails concernant ce passage de l'histoire du redresseur à vapeur de mercure. Les premières applications de cette nouvelle invention concernent principalement la recharge de batteries (voiture, téléphone, télégraphe, cinéma) ainsi que l'éclairage publique qui ne nécessitent pas de grandes puissances de fonctionnement. Très peu de temps après l'invention du redresseur à ampoule de verre, M. Cooper Hewitt imagine des appareils du même type mais conçu sur la base d'une cuve métallique qui remplace l'ampoule en verre (U.S. Patent #1.007.694)[343]. Ce type de redresseur est construit pour la première fois par la compagnie Westinghouse en 1910[344], mais il possède l'inconvénient de nécessiter l'utilisation d'une infrastructure importante destinée à maintenir le vide à l'intérieur de la cuve. Dans les deux cas, on cherche généralement à augmenter la puissance de fonctionnement des appareils, tout en améliorant leur rendement et leur durée de vie. Le développement de matériaux spécifiques (verres et aciers) ainsi que la recherche permanente de méthodes permettant des jointures parfaites sont deux aspects qui accompagnent l'évolution de ces appareils. Tout au long de leur utilisation, les innovations apportées à ces deux types de redresseurs (fonctionnement, forme, matériaux) vont permettre de leur donner des applications nouvelles et de plus en plus spécifiques. Redresseur à vapeur de mercure à ampoule de verre et à cuve métallique

[342] POLOUJADOFF, 1969, p122 et 124

[343] HERSKIND & MORACK 1987, p6

[344] AZEVEDO, 1950

sont en compétition à partir de 1915, aux Etats-Unis, dans le domaine des transports urbains (trams, trolleybus)[345].

Une légère modification du principe de fonctionnement (adjonction de grilles polarisantes), apportée aux ampoules de verre à partir des années 1930, permet certaines améliorations dont la principale est l'inversion du processus de rectification du courant électrique[346]. Ainsi, le redresseur à vapeur de mercure ne permet plus uniquement la production du courant continu à partir de courant alternatif, mais également la production de courant alternatif à partir de courant continu. Cette adaptation amène à l'emploi d'un nouveau terme, introduit par la compagnie Brown Boveri (Suisse), pour désigner l'appareillage permettant de modifier la nature du courant : le «mutateur» (du latin *Mutare* : changer, varier, transformer)[347].

A partir du moment où la technologie du redresseur à vapeur de mercure permet d'atteindre des puissances suffisamment élevées, ce dernier est employé couramment pour d'autres applications spécifiques tels que les chemins de fer (1925), certaines applications dans le domaine de l'électrochimie (1930) telles que la production de l'aluminium par électrolyse ainsi que d'autres applications industrielles telles que la métallurgie de l'acier (1950)[348]. Le besoin de travailler à des puissances de plus en plus élevées et les limites techniques (dimensions, montage en parallèle compliqué) des redresseurs à ampoules de verre, amènent au développement de redresseurs à cuve métallique multi-anodes (6, 12, 18, 24) qui permettent d'atteindre des puissances très élevées (12 000 A pour 600 V). La grande innovation dans le domaine des redresseurs à cuve métallique est liée à la conception, grâce aux progrès menés dans la technique du vide, d'un type de redresseur parfaitement étanche qui ne nécessite plus de système de pompage (redresseurs scellés). Ce nouveau principe simplifie considérablement la construction et l'installation de ce type d'appareillage, tout en augmentant la sécurité de fonctionnement et en diminuant le prix de revient de l'installation.

Depuis les inventions de M. Cooper Hewitt, de nombreux constructeurs ce sont intéressés à la production et à l'amélioration des redresseurs à vapeur de mercure. Les premiers redresseurs à ampoule de verre construit par Westinghouse (Etats-Unis), ont été ensuite commercialisés par General Electric & C° (Angleterre), Hackbridge & Hewittic Electric C° (Angleterre), les ateliers de construction électrique de Charlerois (France) et ALSTHOM (France). La compagnie Suisse Brown Boveri semble avoir joué un grand rôle dans la production et le développement de redresseurs à cuve métallique et est considérés comme le leader dans ce domaine (application pour les chemins de fer) entre 1925 et 1930 au Canada ainsi qu'aux Etats-Unis[349]. D'autres entreprises ont également

[345] HERSKIND & MORACK 1987

[346] AZEVEDO, 1950, p1

[347] AZEVEDO, 1950, p1

[348] HERSKIND & MORACK 1987

[349] HERSKIND & MORACKM 1987

développés ce type d'appareillage : Siemens (Etats-Unis), Sécheron (Suisse), ALSTHOM (France), ASEA (Suède), AEG (Allemagne), Hartmann et Braun (Allemagne).

4.1.3 TECHNIQUE

Les explications suivantes donneront uniquement les informations nécessaires à une compréhension précise du principe de fonctionnement de ces appareils. On fournira en particulier des explications relatives à la description des éléments constituant un redresseur à vapeur de mercure ainsi qu'à leur fonction, mais également en apportant quelques informations sur les principes physiques mis en jeux. Comme on l'a vu ci-dessus il existe deux principaux types de redresseur à vapeur de mercure : les redresseurs à ampoule de verre et les redresseurs à cuve métallique. Le principe physique de fonctionnement de ces appareils est identique, mais le redresseur de type métallique comporte certains avantages décrit dans le section 4.1.2. Le redresseur à ampoule de verre est utilisé pour l'explication du principe de fonctionnement, car sa morphologie permet une meilleure compréhension. Une installation de redresseur à vapeur de mercure doit comporter, pour produire un courant continu à l'aide d'un courant alternatif : un transformateur, une ampoule à mercure, ou plus techniquement valve mercurielle[350], valve à mercure ou tout simplement valve ainsi que les appareils auxiliaires (circuit d'allumage et d'entretien et de ventilation, etc.)[351]. Dans le présent travail, seule la valve à mercure, élément dans lequel a lieu le processus physique permettant le redressement du courant, fera l'objet d'une description détaillée. Le terme redresseur à vapeur de mercure sera toujours employé pour désigner l'ensemble des éléments permettant le redressement du courant et le terme valve ou ampoule à mercure pour désigner l'élément dans lequel a lieu le processus physique de redressement. La description suivante de l'ampoule à mercure comporte une définition de son principe physique de fonctionnement, suivie de sa morphologie et finalement des matériaux la constituant.

4.1.3.1 Ampoule à mercure

Le principe consiste à faire passer un courant électrique à travers l'ampoule en utilisant les caractéristiques d'ionisation des vapeurs de mercure. Cette ionisation est possible à travers l'excitation (application d'un courant électrique et chaleur) du milieu présent à l'intérieur de l'ampoule et permet la formation d'un arc électrique. Cet arc électrique est formé entre la cathode et une des anodes et c'est à travers lui que passe le courant. Un arc est défini comme étant le résultat d'une différence de charge électrique suffisante entre deux matières conductrices séparées par un matériau isolant (généralement un gaz)[352].

[350] LECORGUILLIER, 1956, p167

[351] ORCHARD, 1935, p34

[352] Internet[21]

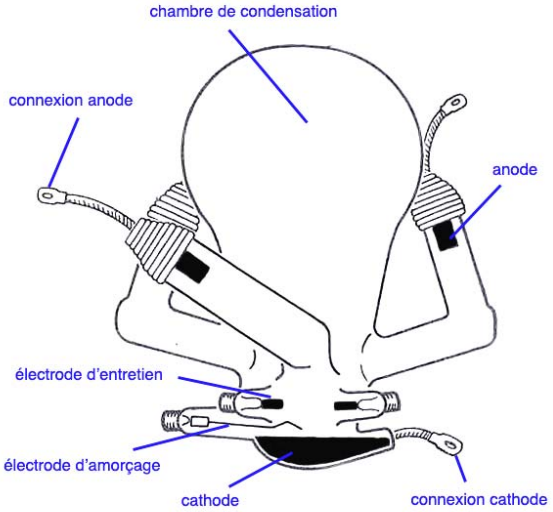


Fig.16 – Ampoule à mercure[353]

La valve à mercure est une ampoule de verre, dont la forme est illustrée sur la fig.16, de plus ou moins grande dimension et munie d'au minimum deux bras. La base de l'ampoule est remplie de mercure et constitue la cathode, alors que les anodes (généralement en graphite) sont scellées aux extrémités des bras en verre. Une électrode d'amorçage est scellée au verre de l'ampoule au niveau de la surface du bain de mercure ainsi que deux autres électrodes placées légèrement en dessus, appelées électrodes d'entretien. Un vide poussé étant créé dans l'ampoule, la pression à l'intérieur se situe aux alentours des 10^{-2} mmHg, ce qui correspond à la pression de la vapeur du mercure lorsque celle-ci se trouve en saturation, pour une température normale de fonctionnement d'environ 50°C. La valve à mercure peut donc être séparée en trois milieux distincts : la cathode (bain de mercure), le vide contenant le gaz de mercure et les anodes.

Dans le cas de l'ampoule, nous avons les deux matières conductrices – cathode de mercure et anode de graphite – ainsi que le matériau isolant constitué par les vapeurs de mercure issues des hautes températures infligées à la surface de la cathode. En appliquant un courant électrique sur l'ampoule, l'anode et la cathode acquièrent une charge électrique. Les conditions nécessaires à la formation de l'arc électrique étant réunies, il est maintenant nécessaire d'expliquer la formation de cet arc ainsi que son comportement, qui sont régis par des principes physiques bien définis.

La description suivante illustre le principe de formation de l'arc électrique de façon très schématique (étape par étape) et est principalement basée sur la description de M. Azevedo Coutinho Braga C.[354]. Avant de parler d'arc électrique, il convient de décrire les phénomènes qui ont lieu dans les vapeurs de mercure lorsqu'une tension est appliquée à l'ampoule. Le passage du courant électrique étant possible uniquement au travers d'un flux d'électrons, il est nécessaire qu'il existe une excitation électronique à l'intérieur de cette ampoule. Les électrons nécessaires sont, dans le cas de ce type de redresseur, libérés des atomes de mercure par un phénomène appelé ionisation. L'ionisation est l'action qui consiste à enlever un ou plusieurs électrons à la structure atomique d'un atome. Cet atome, dépourvu de certains de ses électrons, se trouve alors chargé positivement et est appelé ion[355]. D'après le tableau périodique de Mendeleïev, un atome de mercure possède deux électrons de valence sur sa couche périphérique. Ce sont précisément ces deux électrons qui sont libérés lors du

[353] TIRE DE LECORGUILLIER, 1956, p179 – MODIFIE PAR ©TARCHINI

[354] AZEVEDO, 1950

[355] INTERNET[22]

processus de ionisation. En les perdants, l'atome de mercure se trouve chargé positivement et devient une particule appelée ion Hg^{2+}. L'énergie nécessaire à l'ionisation, appelée énergie d'ionisation, peut, dans le cas d'un gaz, être apportée par une élévation de la température[356]. Il semble que le principe d'ionisation dans l'ampoule à vapeur de mercure repose en partie sur cette particularité (évaporation du mercure par les hautes températures), mais elle est en réalité possible grâce à la combinaison de divers facteurs qui semblent tous être liés les uns aux autres. La plus grande part de l'ionisation du mercure provient de l'arc électrique à la base duquel (bain de mercure) jaillit pratiquement tout le flux d'électrons nécessaire au passage du courant[357]. L'espace contenu à l'intérieur de l'ampoule de mercure peut donc être considéré comme rempli d'atomes neutres de mercure (vapeur non ionisée), d'ions Hg^{2+} et d'électrons[358].

Les mouvements et les directions de ces particules sont créés par le champ électrostatique qui règne à l'intérieur de l'ampoule : les électrons sont attirés par l'anode, de potentiel positif par rapport à la cathode et les ions Hg^{2+} sont attirés par la cathode (potentiel négatif). Les collisions entre les électrons, les ions Hg^{2+} et les atomes neutres font en sorte que ces particules se comportent comme un nuage désordonné dans lequel il y a un mouvement d'électrons vers l'anode et un mouvement d'ion Hg^{2+} vers la cathode. L'électron possédant une masse beaucoup plus petite que celle d'un ion Hg^{2+} et d'un atome neutre, sa vitesse atteint des valeurs 600 fois supérieures. Il peut donc être considéré comme se déplaçant au milieu d'ions Hg^{2+} et d'atomes neutres statiques[359]. Les basses pressions présentes dans l'ampoule permettent aux électrons d'atteindre des vitesses extrêmement élevées[360] et de gagner une énergie suffisante pour libérer les électrons de la couche périphérique des atomes neutre de mercure (constituant les vapeurs) par collision. Les électrons libérés sont à leur tour capable d'ioniser d'autres atomes neutres. L'effet cumulatif de ces réactions provoque une augmentation du nombre d'électrons et de d'ions Hg^{2+} de laquelle résulte une augmentation de l'intensité du courant[361].

Les phénomènes expliqués précédemment décrivent le principe d'ionisation du gaz (vapeur de mercure) compris à l'intérieur de l'ampoule. Cependant, le fonctionnement du redresseur n'est possible qu'à travers la présence d'un arc électrique dont la formation est stimulée artificiellement et décrite dans le paragraphe suivant. Cet arc électrique peut être considéré comme le résultat des phénomènes d'ionisation décrits précédemment, mais également comme une source d'augmentation de la ionisation. En effet, cet arc est principalement constitué par une colonne d'électrons, qui part de la cathode en direction de l'anode, et ces électrons sont le résultat d'une ionisation. D'un autre côté, les conditions (hautes tensions) dans lesquelles se forme l'arc électrique permettent aux ions Hg^{2+} d'acquérir l'énergie nécessaire pour provoquer l'ionisation du bain de mercure par bombardement, et

[356] INTERNET[22]

[357] AZEVEDO, 1950, 1950, p29

[358] AZEVEDO, 1950, 1950, p17

[359] AZEVEDO, 1950, p17

[360] AZEVEDO, 1950, p25

[361] AZEVEDO, 1950, p27

la libération de grandes quantités d'électrons[362]. Ceci explique le fait que l'arc soit le résultat d'une ionisation mais également la source d'une ionisation. Cet arc étant formé, il est capable de transporter un courant électrique très élevé (milliards d'ampères) qui passe de l'anode à la cathode, sachant que la direction prise par le courant électrique est toujours inverse à celle des électrons. La cathode étant une source importante d'émission d'électrons, le courant ne peut passer dans le sens inverse (cathode-anode), ce qui explique la faculté de ces ampoules de jouer le rôle de redresseur. L'écoulement du courant dans la colonne d'électrons donne naissance à un phénomène lumineux caractéristique que l'on appelle communément arc électrique. Ce phénomène est accompagné de la formation d'une tache luminescente, appelée tache cathodique, à la surface du bain de mercure (fig.17). Bombardée par les ions Hg^{2+}, cette dernière est constamment en déplacement (18 m/s) sur la surface du bain de mercure et atteint des températures avoisinant les 600°C[363]. Cette tache constitue la base de l'arc électrique et d'elle jaillis la vapeur de mercure ainsi que le flux d'électrons[364]. Le rôle de la vapeur de mercure est très important dans ce processus, car une ampoule constituée uniquement de vide serait un milieu trop isolant, ce qui nécessiterait des tensions beaucoup plus élevées pour permettre la progression du courant par ionisation.

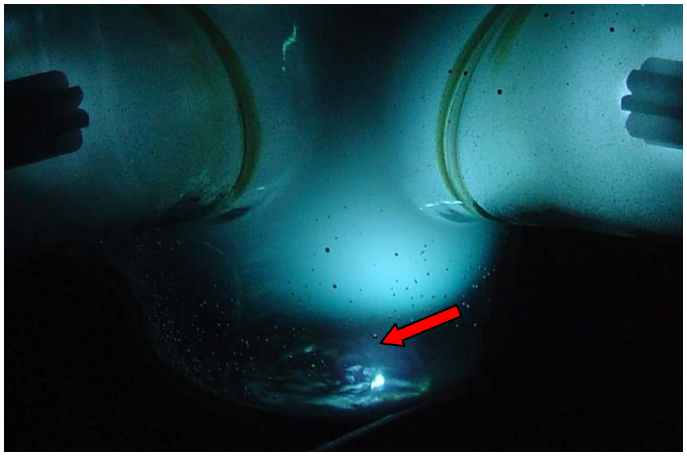


Fig.17 – Tache cathodique à la surface du bain de mercure (cathode) [365]

La description précédente apporte principalement des informations sur la constitution de l'arc, mais n'explique pas quel est le comportement de l'arc électrique dans une ampoule à vapeur de mercure et ne donne pas non plus les conditions nécessaires à son entretien. Le principe de la mise en service de l'ampoule à mercure est illustré sur la fig.18 et consiste à amorcer artificiellement un arc électrique à la surface du bain (I), qui est transmis ensuite aux électrodes d'entretien (II) et finalement aux anodes principales de l'ampoule (III).

[362] AZEVEDO, 1950, p28

[363] LECORGUILLIER, 1956, p167

[364] AZEVEDO, 1950, p29

[365] INTERNET[23]

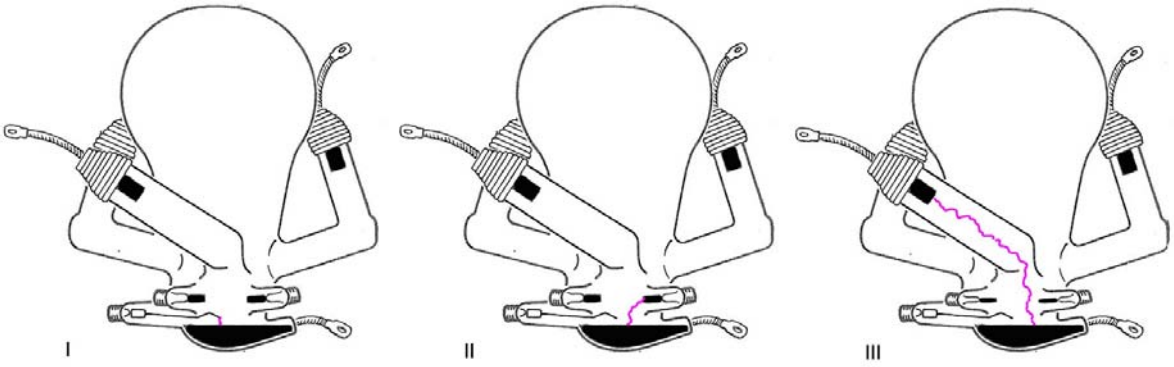


Fig.18 – Etapes de la formation de l'arc électrique pendant le démarrage d'une ampoule à mercure [366]

Le principe d'amorçage de l'arc électrique repose sur les mêmes principes physiques que cités précédemment. Cependant, les conditions sont dans ce cas plus favorables, car la taille de l'arc est nettement inférieure à celui nécessaire au fonctionnement de l'appareil. Il existe divers procédés d'amorçage qui reposent tous sur le même principe que le procédé Alsthom illustré sur la fig.19a et clairement décrit par J. Lecorguillier[367].

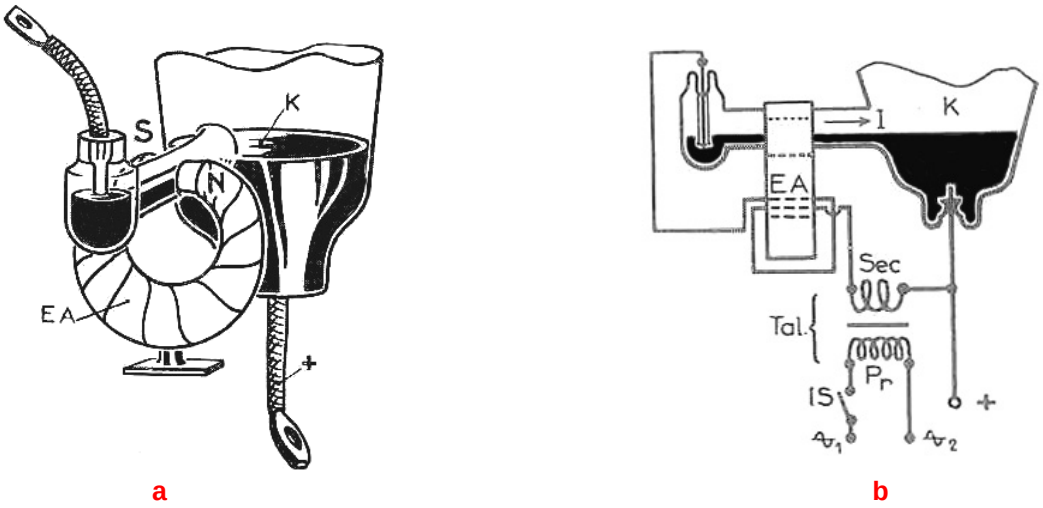


Fig.19 – Procédé Alsthom d'amorçage de l'arc électrique dans une ampoule à mercure : S – appendice ; EA – électro-aimant ; Tal – transformateur ; K – mercure [368]

Le réservoir du bain de mercure est conçu de façon à ce qu'un appendice S, comportant un étranglement sur lequel est placé un électro-aimant EA et une connexion électrique, fasse office d'anode d'amorçage. Un circuit électrique (fig.19a) est créé entre la borne positive de la cathode, le secondaire du transformateur *Tal*, l'électro-aimant EA et la connexion de l'appendice. Lorsque le circuit est parcouru par un courant électrique, le champ magnétique provoqué par l'électro-aimant crée la rupture de la veine de mercure. De ceci résulte la formation d'un arc électrique permettant au

[366] LECORGUILLIER, 1956, p179 – MODIFIE PAR ©TARCHINI

[367] LECORGUILLIER, 1956, p169

[368] LECORGUILLIER, 1956, p168

courant de poursuivre son passage. Ceci permet d'amorcer la tache cathodique à la surface du bain. Le circuit d'amorçage est alors automatiquement coupé et les électrodes d'entretien, ainsi que les électrodes principales, alimentées en courant, entretiennent à leur tour l'arc électrique. Dans le premier procédé employé par Cooper Hewitt, la rupture de la veine de mercure n'était pas produite par l'action d'un électro-aimant, mais par le basculement de l'ampoule[369].
Les figures 20 et 21 représentent deux autres dispositifs développés par Hewittic et également décrit dans l'ouvrage de J. Lecorguillier[370].

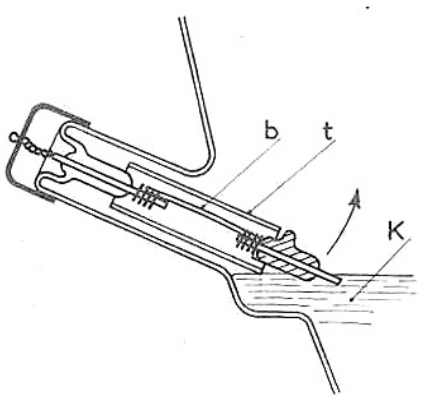


Fig.20 – Dispositif bilame pour l'amorçage de l'arc électrique dans une ampoule à mercure
b - tige en métal ; K - mercure ; t – cylindre [371]

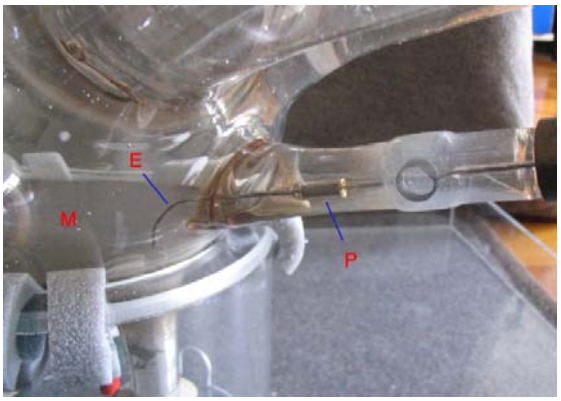


Fig.21 – Dispositif magnétique Hewittic pour l'amorçage de l'arc électrique dans une ampoule à mercure : E -électrode ; P-palette ; M -mercure [372]

Le dispositif à bilame (fig.20) consiste à employer les propriétés de dilatation d'une tige en métal b sous l'effet de l'échauffement produit par le passage d'un courant électrique. Sous ces conditions, le bilame se déforme de telle sorte que l'extrémité de l'anode, trempant dans le bain de mercure K, se soulève et produise un arc électrique en se dégageant de la surface. Le dispositif magnétique Hewittic (fig.21) est constitué d'une électrode E et d'une palette P qui, sous l'effet d'une bobine magnétique placée en dessous, est attiré vers le bain de mercure M. La pointe de l'anode est ainsi trempée dans le mercure et un courant passe entre la connexion de l'anode d'amorçage et la connexion de la cathode. Le passage de ce courant provoque la coupure de l'excitation de la bobine magnétique et la pointe de l'anode E se relève. Ceci entraîne la formation d'une étincelle (arc électrique) permettant l'amorçage de la tache cathodique.

Dans tous les principes décrits précédemment, une fois l'arc électrique amorcé, le circuit d'amorçage est automatiquement coupé à l'aide d'un relais placé dans le circuit et l'électrode qui servait d'anode ne peut plus débiter de courant. L'extrémité supérieure de l'arc se transmet alors aux électrodes d'entretien qui sont à présent alimentées par le circuit d'excitation. L'arc est ensuite transmis aux anodes principales et constamment entretenu par les électrodes d'entretien, et le processus de

[369] LECORGUILLIER, 1956, p168
[370] LECORGUILLIER, 1956, p170-171
[371] LECORGUILLIER, 1956, p171
[372] INTERNET[22]– MODIFIE PAR ©TARCHINI

rectification du courant peut commencer. Quelque soit le nombre de bras (anodes) constituant l'ampoule, la base de l'arc est toujours située à la surface du bain de mercure et l'autre extrémité, en alternance, au contact d'une des anodes. Cela sous-entend qu'une seule anode débite du courant à la fois; uniquement lorsque son potentiel est positivement supérieur à celui des autres anodes et à celui de la cathode[373]. Ce principe est clairement décrit par Orchard Frederick Charles[374]dans son ouvrage intitulé *Mercury Arc Rectifier Practice.* Les schémas de la fig.22 représentent une ampoule à mercure à trois anodes (W, B et R) vue de dessus avec son circuit d'entrée (AC = courant alternatif) et de sortie (DC = courant continu). Chaque schéma représente une des trois étapes du cycle de fonctionnement et la barre X (en violet) l'arc électrique, soit le passage du courant. Les conducteurs du circuit représentés en rouge correspondent au passage du courant dans le circuit. Les courbes représentent la forme du courant alternatif triphasé d'entrée en fonction du temps sur les trois anodes W, B et R ainsi que la forme de la courbe du courant continu de sortie. En observant la période de la courbe du courant d'entrée correspondant à l'anode W, on remarque que la valeur de son potentiel part d'une valeur nulle, atteint un maximum positif, repasse par la valeur nulle, atteint une valeur maximum négative et retourne à zéro. Pendant l'intervalle de temps (représenté en jaune) où l'anode W se trouve à un potentiel positif supérieur aux autres anodes et à la cathode, l'arc se dirige dans sa direction et le passage du courant correspond au schéma I. Une fois que le potentiel de l'anode W passe à un niveau inférieur à celui de l'anode B, cette dernière attire l'arc pendant l'intervalle de temps (représenté en bleu) où son potentiel est supérieur aux autres. Le passage du courant correspond alors au schéma II. Le même phénomène se produit entre l'anode B et l'anode R, et le processus peut recommencer à partir de l'anode W.

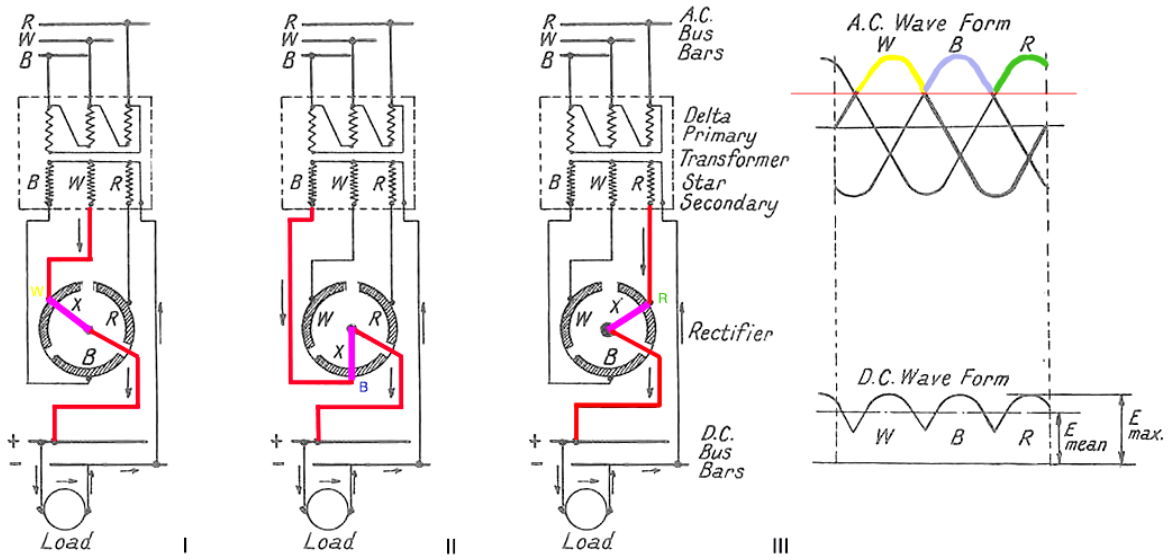


Fig.22 – Parcours (I, II et III = 1 cycle de fonctionnement) et forme du courant électrique dans l'ampoule à mercure et son circuit d'alimentation [375]

[373] ORCHARD, 1935, p8

[374] ORCHARD, 1935, p8-12

[375] ORCHARD, 1935, p101-103 – MODIFIE PAR ©TARCHINI

La comparaison entre la forme de la courbe du courant alternatif à l'entrée de l'ampoule (anode) et la forme de la courbe de sortie du courant continu (cathode) représente schématiquement le résultat du processus de rectification du courant expliqué à la section 4.1.1. Seule une portion des alternances positives (au-dessus de la ligne rouge), correspondant au sens normal de passage du courant alternatif, sont conservées. Le courant alternatif d'entrée se trouve ainsi transformé en courant continu.

L'explication de certains phénomènes qui ont lieu aux alentours de la tête de l'anode, pendant l'intervalle de temps où elle attire l'arc et celui où elle le repousse, permet d'éclaircir le phénomène de passage de l'arc d'une anode à l'autre. Les schémas de la fig.23 illustrent les étapes d'un cycle de passage du courant à travers une des anodes de l'ampoule : l'électrode est représentée en gris et le milieu qui l'entoure en jaune. Au moment où l'anode possède un potentiel positif et supérieur aux autres anodes et à la cathode, cette dernière attire les charges négatives (schéma I). Le pont (arc électrique), formé d'électrons, entre le bain de mercure (source d'électrons) et l'anode est alors créé et le courant peut passer à travers l'ampoule. En attirant les électrons, l'anode tend à se charger négativement, jusqu'au point où elle ne va plus les attirer mais les repousser. L'anode devenue de potentiel négatif, par rapport aux autres, attire les ions Hg^{2+} (charges positive) qui se placent aux environs de la tête de l'anode et créent une barrière isolante[376] (schéma II). Certaines des charges électriques sont alors repoussées vers d'autres parties de l'ampoule et d'autres se recombinent entre elles pour former des atomes de mercure. La faible densité d'ionisation alors présente autour de l'anode ne permet plus le passage du courant et l'arc électrique s'éteint. Le milieu entourant l'anode retrouve un équilibre normal (schéma III), et après que le même processus ai eu lieu avec les autres anodes, le cycle peut recommencer. En réalité, ce processus a lieu à des vitesses extrêmement élevées, et le seul effet perceptible à l'oeil est un scintillement de l'ampoule.

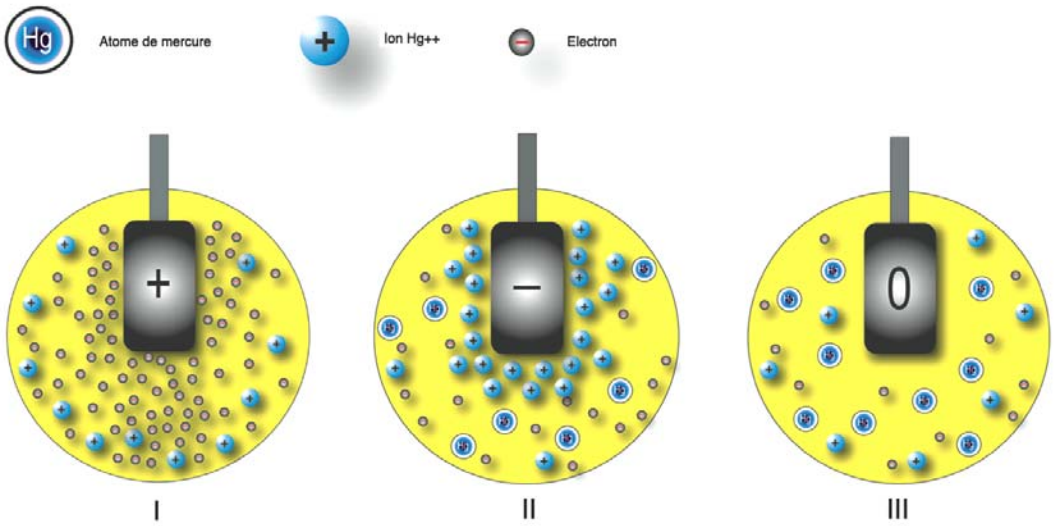


Fig.23 – Evolution du milieu entourant l'anode pendant un cycle de fonctionnement de l'ampoule à mercure [377]

[376] AZEVEDO, 1950

[377] ©TARCHINI

Certaines conditions de fonctionnement doivent être respectées pour que le redressement du courant se déroule de façon optimale. Ces particularités sont décrites ci-dessous, après une définition des principaux dysfonctionnements d'une ampoule à mercure. Les conséquences sur le fonctionnement lorsque les conditions ne sont pas remplies ainsi que les éventuels moyens employés pour les obtenir sont également décrits.

Principaux dysfonctionnements : les principaux dysfonctionnements d'une ampoule à mercure sont la formation d'arc en retour et la présence d'une chute de tension trop élevée. Un arc en retour est un arc qui se crée entre les diverses anodes. Lorsque l'anode se trouve à un potentiel négatif, celle-ci a tendance à attirer les ions positifs Hg^{2+} (fig.23 - schéma II). Certains de ces ions peuvent, par bombardement, former une tache cathodique à la surface de l'anode qui devient elle-même source d'électrons. Ces électrons sont attirés par les autres anodes, ce qui provoque la formation d'un arc en retour. Généralement, la formation d'un arc en retour est due à trois causes[378] : les ultraviolets émis par la cathode qui atteignent l'anode, la présence d'impuretés dans le matériau constituant l'anode et la présence de gaz étrangers dans l'enceinte de l'ampoule. Un arc en retour (anode-cathode) peut également être créé lorsque les projections de mercure (vapeur) émises par la cathode atteignent une des anodes. La formation d'un arc en retour peut provoquer l'extinction de la tache cathodique[379]. La chute de tension peut être définie comme étant la portion d'énergie perdue dans le redresseur[380]. Ceci correspond à la résistance opposée au passage du courant par le vide contenu dans l'ampoule. Cette chute de tension est comprise, pour un fonctionnement normal, entre 18 et 30 V[381]. Une chute de tension trop élevée comporte, comme principal inconvénient, une diminution du rendement du redresseur. Les causes ainsi que les moyens d'éviter la formation d'un arc en retour et d'une chute de tension trop élevée sont décrits ci-dessous.

Pression à l'intérieur de l'ampoule : la valeur de la pression du milieu constituant l'intérieur de l'ampoule (12×10^{-3} mmHg) joue un rôle très important pour le fonctionnement du redresseur à vapeur de mercure. Lorsque cette valeur de pression n'est pas respectée (trop importante ou trop faible), la chute de tension dans l'ampoule peut atteindre des valeurs trop élevées. Une élévation de la pression facilite également la formation d'arcs en retour[382]. D'un point de vue plus physique : lorsque la pression est trop faible (peu d'atome de Hg), les possibilités de collision entre atomes et électrons sont réduites et l'ionisation du milieu est trop faible. Lorsque la pression est trop élevée (beaucoup d'atomes de Hg), le libre parcourt des électrons est réduit et ces derniers n'atteignent pas une énergie suffisante pour ioniser avant d'entrer en collision avec les atomes de mercure[383]. Le principal moyen d'obtenir une pression normale de fonctionnement consiste à réguler la température de l'ampoule.

---

[378] ORCHARD, 1935, p3

[379] AZEVEDO, 1950, p58

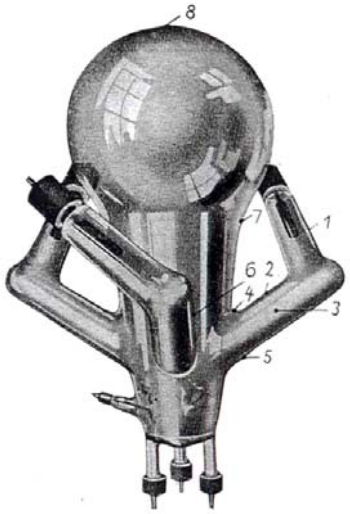
[380] ACEC, 1938, p88

[381] AZEVEDO, 1950, p53

[382] AZEVEDO, 1950, p6

[383] AZEVEDO, 1950, p30

Température de l'ampoule : comme nous venons de le voir, la régulation de la température est un aspect important pour le bon fonctionnement de l'ampoule à mercure. Des valeurs de température trop basses (diminution de la pression) ou trop élevées (augmentation de la pression) modifient la pression normale de fonctionnement de l'ampoule et provoquent les dysfonctionnements qui en découlent (voir ci-dessus).



Températures relevées en service normal à pleine charge	
1	250°C
2	115°C
3	100°C
4	120°C
5	90°C
6	140°C
7	60°C
8	70°C

Fig.24 – Températures sur diverses zones de la surface de l'ampoule durant le fonctionnement [384]

Lorsque la température est trop basse (inférieure à 10°C[385]), la formation de vapeur est insuffisante pour l'amorçage de l'arc. Les trop hautes températures engendrent des contraintes supérieures sur les matériaux constituant l'ampoule, ce qui entraîne leur dégradation. La fig.24 indique les diverses températures mesurées à la surface de l'ampoule durant le fonctionnement. On peut constater que les températures maximum sont mesurées sur les bras et principalement à leurs extrémités. Ceci est dû au rayonnement des anodes en graphite dont les températures de fonctionnement sont comprises entre 600 et 800°C. Indépendamment du fait que la morphologie de l'ampoule soit définie pour éviter un échauffement trop important, la température est généralement régulée par un système de ventilation forcée dont le principe est expliqué dans le section 4.1.3.2.

Puissance: la puissance de fonctionnement est le produit entre le courant et l'intensité parcourant l'ampoule (P = U x I). Avec de faibles tensions de fonctionnement, de grandes intensités peuvent être fournies. Inversement, lorsque la tension de service est grande, l'ampoule ne peut supporter que de faibles intensités de courant. La puissance d'une ampoule doit être adaptée à sa morphologie (forme et dimension)[386]. Lorsque l'intensité est supérieure à la valeur recommandée, l'échauffement devient

[384] J. D., 1931, p13

[385] LECORGUILLIER, 1956, p173

[386] LECORGUILLIER, 1956, p172

trop important, l'ampoule à mercure ne peut plus fonctionner correctement et les matériaux sont soumis à des contraintes supérieures à celles définies lors de leur fabrication.

Indépendamment du fait que les ampoules à mercure ont des formes très élégantes qui leurs donnent un petit air d'objet de contemplation, la morphologie d'une ampoule à mercure est d'une grande importance pour le fonctionnement du processus de rectification. Chaque courbe est étudiée pour limiter au maximum les amorces de ruptures[387] et l'ampoule, dans son ensemble, est dessinée pour résister aux pressions (atmosphérique et électrique) et aux hautes températures engendrées durant le fonctionnement. Le tronc d'une ampoule, appelé dôme, et principalement sa partie supérieure (chambre de condensation) constitue une grande surface exposée à des températures (ambiantes) nettement inférieures à celles présentes en d'autres zones à l'intérieur de l'ampoule (fig.24). Ceci permet aux vapeurs de mercure de se refroidir et de condenser, afin de couler le long des parois pour revenir au bain de mercure. Cette particularité illustre le fait qu'une cathode d'ampoule à mercure est pratiquement inconsommable, en comparaison à une cathode solide constituée d'un autre métal dont la matière tend à se détruire. La forme des bras en verre des anodes joue également un grand rôle dans le bon fonctionnement de l'appareil. Un bras d'ampoule de mercure doit assurer que la quantité de vapeur de mercure entrant dans ce dernier soit minimum, que les projections de mercure (vapeurs) n'atteignent pas la tête de l'anode, que les vapeurs de mercure puissent se condenser et que la tête de l'anode soit protégée des radiations ultraviolettes émises par la cathode[388]. Bien que les ampoules à mercure aient toutes une forme commune, il existe des variantes en fonction de l'application et plus particulièrement des puissances mises en jeux. L'annexe 8 illustre la série des ampoules Hewittic fabriquées dans les années 1950[389]. D'une manière générale, plus la puissance est importante, plus l'ampoule est de grande dimension et plus le nombre de bras est important[390]. Les plus petites ampoules (annexe 8 – type 1) sont généralement employées pour des puissances comprises entre 1100 et 2200 Watt[391] et les plus importantes (type 60) pour des puissances comprises entre 55'000 et 285'000 Watt[392]. La forme et la dimension des bras est un aspect très important pour la construction des ampoules. Pour des basses tension (jusqu'à 200 V), les bras sont de type droit (annexe 8 – type 1) alors que pour des tensions plus élevées, les bras sont de type coudé[393] (annexe 8 – types 2, 8, 15, 20 et 60) et peuvent comporter une chambre de condensation à l'encoudure, dans le cas d'une installation avec refroidissement artificiel (annexe 8 - type 8 avec grille et type 20)[394].

Les matériaux constituant l'ampoule sont également d'une grande importance et sont sélectionnés et souvent même spécialement développés pour résister aux contraintes engendrées pendant le

[387] MARKMAN, mail du 10.12.2005

[388] AZEVEDO, 1950, p7

[389] LECORGUILLIER, 1956, p174-181

[390] LECORGUILLIER, 1956, p172

[391] LECORGUILLIER, 1956, p174

[392] LECORGUILLIER, 1956, p181

[393] LECORGUILLIER, 1956, p173-174

[394] AZEVEDO, 1950, p6

fonctionnement. Ce paragraphe donne une idée des matériaux employés et de la manière dont ceux-ci sont assemblés, facteurs importants pour la détermination de la durée de vie de l'ampoule. Le verre est le principal matériau composant l'ampoule et également celui qui est soumis à une double contrainte ; hautes températures et fortes contraintes mécaniques (dues au vide qui est créé à l'intérieur et aux tensions créées par les décharges électriques). La plupart des verres employés pour la fabrication des valves à mercure sont de type borosilicaté, seule catégorie qui remplit les exigences requises. Cependant, d'autres variantes de verre ont été employées en fonction du fabricant d'ampoule. Une des principales difficultés liées à la fabrication de valves à mercure est la nécessité de créer une jointure parfaite entre le verre et le métal de scellement, dans les zones où sont introduites les électrodes[395]. En effet, deux matériaux (verre et métal) doivent avoir un coefficient de dilatation le plus proche possible afin d'éviter toute rupture du matériau le plus fragile (dans ce cas le verre) ou des lacunes au niveau de l'étanchéité[396]. Un des premiers métaux employés pour sceller les anodes dans le verre semble avoir été le platine qui possède le coefficient de dilatation le plus proche du verre employé dans les débuts[397]. Le cuivre semble également avoir été employé, mais revêtu d'un autre métal permettant de protéger l'élément contre les vapeurs de mercure[398]. En effet, le cuivre et le mercure réagissent entre eux, formant un amalgame. Les améliorations au niveau du verre employé ont permis d'utiliser des métaux plus résistants que le cuivre et moins coûteux que le nickel (métal semi-précieux): le molybdène et le tungstène. Le tableau présenté en annexe 9 donne les informations de base sur les diverses liaisons employées en fonction de l'époque de fabrication. Un alliage commercial du nom de Kovar à été spécialement développé pour les applications nécessitant une isolation parfaite dans des appareillages soumis à de fortes contraintes durant l'utilisation. Le Kovar est un alliage contenant 29% de nickel, 17% de cobalt et 54% de fer[399] et son coefficient de dilatation est très proche de celui des verres de haute résistance. La jonction entre le verre et le métal se fait à travers une liaison chimique[400] : formation d'un oxyde à la surface de l'alliage qui se dissout dans le verre lors de l'assemblage à chaud. Quant aux anodes, celles-ci sont en fer dans les premières ampoules à mercure. Ce métal a été par la suite remplacé par le graphite, beaucoup plus résistant[401].

4.1.3.2 Redresseurs à vapeur de mercure à cuve métallique

Un redresseur à vapeur de mercure à cuve métallique fonctionne sur le même principe que l'appareillage décrit ci-dessus : passage d'un arc électrique dans un espace hermétiquement clos saturé en vapeurs de mercure. Cependant, à la place d'une ampoule en verre comme espace clos, ce type d'appareillage utilise une cuve métallique. Il existe deux types de redresseurs à cuve métallique qui se différencient par la manière d'obtenir le vide à l'intérieur de la cuve : le redresseur avec pompe

[395] AZEVEDO, 1950, p5

[396] BRANDT & LATIMORE, 1946, p137

[397] AZEVEDO, 1950, p6

[398] BRANDT & LATIMORE,1946, p138

[399] BRANDT & LATIMORE,1946, p138

[400] BRANDT & LATIMORE, 1946, p139

[401] ORCHARD, 1935, p3

à vide et le redresseur à cuve scellée. Le premier nécessite une infrastructure importante, alors que le deuxième est de construction beaucoup plus simplifiée. Le redresseur à cuve métallique avec pompe à vide est constitué d'une grande cuve cylindrique présentant à sa base la cathode liquide à mercure (fig.25). Sur la partie supérieure de ce cylindre est posé un couvercle comportant les autres électrodes (anode, entretien, démarrage). Les difficultés de fabrication de ce genre de redresseur reposent sur la création d'une jointure la plus hermétique possible entre la cuve et le couvercle[402]. L'herméticité n'étant jamais parfaite, cet appareillage nécessite un système de pompage tel qu'une pompe à mercure (Langmuir) ou un système de pompage rotatif à huile, permettant de garantir le meilleur vide durant toute la durée de fonctionnement[403]. Cet équipement doit également être muni d'un dispositif de contrôle (gauge McLeod ou Pirani), permettant de vérifier l'existence du vide nécessaire[404].

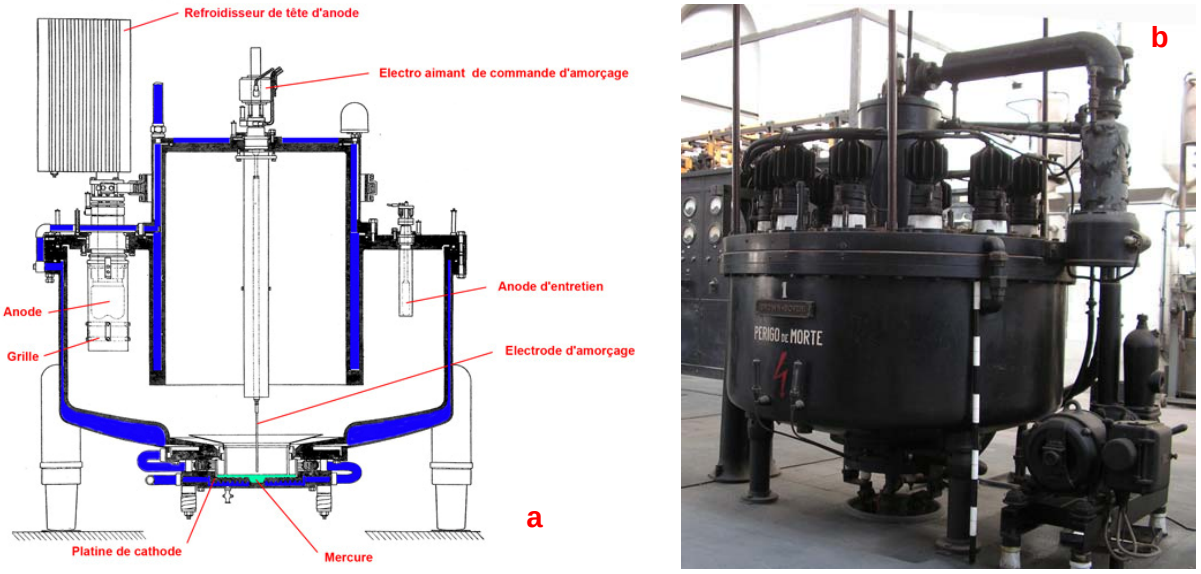


Fig.25 – Redresseur à cuve métallique avec pompe à vide. (**a**) coupe caractéristique de ce genre de redresseur, les parties en bleu représentent le parcours de la circulation d'eau (refroidissement)[405]. (**b**) redresseur Brown Boveri à cuve métallique avec pompe à vide à refroidissement à eau du musée des trams de Porto [406]

Il existe de nombreuses variantes de ce type de redresseurs dont les principales différences sont les dimensions ainsi que le nombre d'anodes, caractéristiques proportionnelles aux puissances de fonctionnement. La figure 25 représente une vue en coupe classique d'un redresseur à vapeur de mercure à cuve métallique avec pompe à vide. Le système de pompage et la circulation d'eau, qui représente une infrastructure importante, ne sont pas représentés sur cette figure.

[402] ORCHARD, 1935, p50

[403] ORCHARD, 1935, p52-54

[404] ORCHARD, 1935, p55

[405] ORCHARD, 1935, p48 – modifié par ©TARCHINI

[406] ©TARCHINI

Parmi les problématiques de fabrication rencontrées dans la conception d'un redresseur à pompe à vide, la recherche d'une jointure parfaite entre les divers éléments d'assemblage reste un des sujets les plus étudiés. Il existe de nombreux types de joints différents tels que caoutchouc, Micalex (mica et borate de plomb), Weintraub (à base d'acier et de verre)[407]. Le tableau présenté en annexe 9 donne les références de divers types de jointures employées en fonction des dates et de la capacité approximative de l'appareil[408]. Des joints au mercure ont également été employés dans certains types de redresseurs avec pompe à vide. Ceux-ci consistent en un matériau résistant (amiante) placé entre une isolation de porcelaine, le tout rempli à l'aide de mercure. Les appareils comportant ce type de jointure sont généralement munis de niveaux en verre (sur le couvercle) permettant le contrôle de la maintenance du vide[409].

Le redresseur à vapeur de mercure à cuve métallique scellée (fig.26) comporte l'avantage de ne plus nécessiter de système de pompe à vide. Tout comme les ampoules en verre, un vide parfait est créé lors de la fabrication de la cuve qui bénéficie d'une herméticité totale.

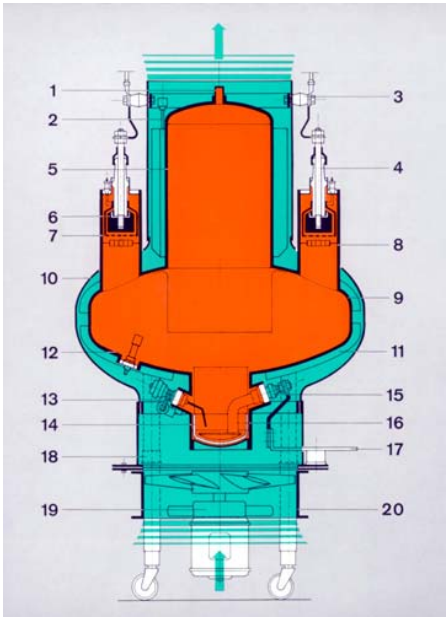


Fig.26 – Redresseur à cuve métallique scellée Siemens avec refroidissement à air (en vert): 1 - bout de la pipe de raccordement ; 2 - deux thermostats ; 3 - isolateurs intermédiaires et connexions souples ; 4 - traversées d'anodes ; 5 - dôme de condensation ; 6 - anodes principales ; 7 - grilles de déionisation; 9 - cuve en tôles d'acier ; 10 - gainage métallique ; 11 - ailettes de refroidissement ; 12 - anodes auxiliaires d'excitations ; 13 - électrode auxiliaire d'allumage ; 14 - coupelle ; 15 - traversée de cathode ; 16 - cathode à mercure ; 17 - raccordement cathodique ; 18 - structure pour roulettes ; 19 - groupe moto-ventilateur ; 20 - châssis de roulement. (a)[410], (b) [411]

[407] ORCHARD, 1935, p50-51

[408] HERSKIND & MORACKM 1987, p6

[409] ORCHARD, 1935, p50-50

[410] SÉCHERON

[411] ©TARCHINI

Ce type de redresseur est généralement de plus petite dimension, de construction plus fiable et plus sûre et se rapproche plus au moins de la forme d'une ampoule en verre. Il comporte un circuit de refroidissement à air ou à eau qui est directement intégré dans l'appareil. Ce type de redresseur est muni de jointures beaucoup plus solides et résistantes, puisque l'herméticité doit être assurée sur le long terme d'une manière constante.

Le redresseur métallique à cuve scellée est généralement constitué d'une enveloppe en tôle d'acier à l'intérieur de laquelle est installée la cuve sous vide comportant le mercure. Entre l'enveloppe et la cuve circule généralement l'air de refroidissement.

4.2 LES TROIS REDRESSEURS « HACKBRIDGE & HEWITTIC"

4.2.1 HISTORIQUE DE LA MARQUE

4.2.1.1 Peter Cooper Hewitt et la lampe à vapeur de mercure

Peter Cooper Hewitt (1861 – 1921), né le 5 mars 1861 à New York, est le fils d'Abram Stevens Hewitt, fabricant de métal, négociant et politicien ainsi que le petit fils de Peter Cooper, ingénieur industriel de renom et fondateur du Cooper Institute à New York[412]. Peter Cooper Hewitt réalise ses études dans des institutions réputées telles que le Stevens Institute of Technology (Hoboken) et la Columbia University of Mines (New York) et, sur la base du savoir de son père et de son grand-père, il développe rapidement ses propres centres d'intérêt. A la fin du 20e siècle (1890), il cherche à améliorer le système d'éclairage qui, à l'époque, ne lui semblait pas assez performant (5% de lumière pour 95% de chaleur). En parallèle aux travaux de Thomas Alva Edison (1847 – 1931), qui cherche à développer une source de lumière incandescente par le biais d'un filament, Peter Cooper Hewitt développe une source de lumière à partir du principe de la conduction d'une charge électrique par un gaz.

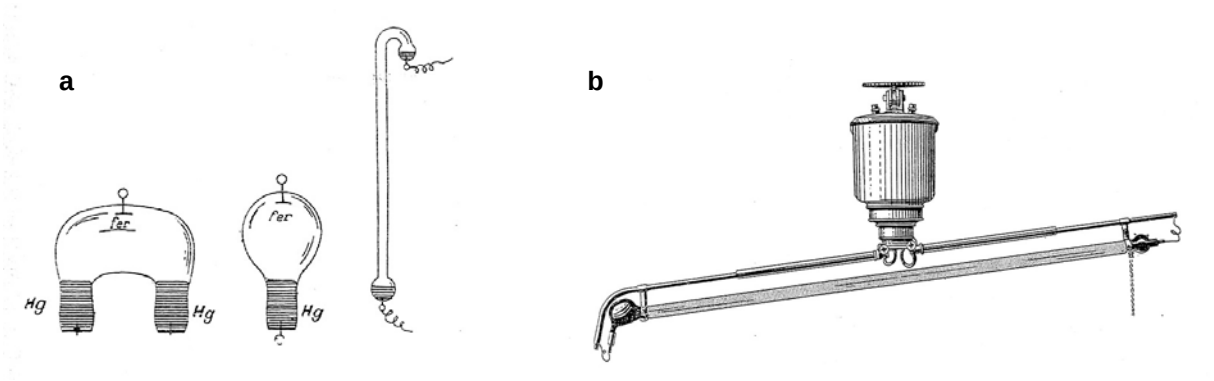


Fig.27 – a : premiers tubes fabriqués par Peter Cooper Hewitt. **b** : première lampe commercialisée par Peter Cooper Hewitt ; le basculement du tube en quartz (allumage) provoque l'écoulement d'un mince filet de mercure qui, sous l'effet du courant électrique, se volatilise et permet la luminescence [413]

[412] MOHAMMED

[413] BERTHIER, 1908

C'est ainsi qu'il invente (1er brevet en 1900) la lampe à vapeur de mercure (The Cooper Hewitt mercury-vapor lamp) dont le principe consiste à faire passer un courant électrique à travers de la vapeur de mercure scellée dans un tube en quartz (fig.27)[414].

La lampe à vapeur de mercure devient beaucoup plus avantageuse que les systèmes d'éclairage existant, mais la lumière fournie par ce type de lampe est d'une teinte blafarde (excès de rayons bleus) et reste uniquement applicable pour des situations ou la couleur de la lumière n'est pas importante. Cette lumière est décrite, dans un ouvrage d'époque[415], comme donnant aux visages une teinte cadavérique fort peu séduisante. En cherchant à améliorer la teinte de la lumière fournie par la lampe à vapeur de mercure (addition d'un spectre rouge), Peter Cooper Hewitt développe une lampe ultraviolette puissante qui deviendra utile dans de nombreuses applications : thérapeutique, stérilisation, chimie[416]. Le succès de la lampe à vapeur de mercure amène de nombreux scientifiques (Bastian, Heraeus, Schott, etc.)[417] à développer leurs propres lampes.

4.2.1.2 Les premiers redresseurs à vapeur de mercure

M. Peter Cooper Hewitt ne s'arrête pas aux perspectives d'éclairage de sa nouvelle invention et découvre que cette dernière possède la faculté de convertir un courant électrique (transformation d'un courant alternatif en courant continu). Sur la base du développement d'une lampe à vapeur de mercure, Peter Cooper Hewitt va donc développer un redresseur à vapeur de mercure dont la première apparition officielle est la présentation d'un redresseur permettant de fournir du courant pour une lampe à vapeur de mercure, en avril 1901 à l'université de Columbia[418]. Le 16 mai 1902, il dépose son premier brevet (US Patent #749,791)[419] et sa nouvelle invention est déjà employée pour d'autres applications telles que la recharge de batterie. Les premiers redresseurs Cooper-Hewitt pour courant alternatif monophasé se composent d'un tube de verre en U renversé dont chaque extrémité est pénétrée par une électrode et remplie de mercure. En position verticale, les deux électrodes sont reliées par le bain de mercure et le courant passe naturellement (dans les deux sens) à travers ce dernier. Lorsque le dispositif est basculé, le pont de mercure qui faisait communiquer les deux électrodes est rompu et le courant ne passe plus que dans un seul sens (courant continu), à travers un arc électrique[420]. Ce premier type de dispositif ne permettant de redresser que la moitié des demi-ondes alternatives (fonctionne comme une soupape), Peter Cooper Hewitt développe un dispositif qui permet de redresser les deux demi-ondes. Cet appareil est représenté sur la figure 28 et ressemble beaucoup aux types de redresseurs que l'on verra se développer tout au long de la première moitié du 20ème siècle et qui est décrit en détails dans le section 4.1.3.

---

[414] BERTHIER, 1908, p205-207

[415] BERTHIER, 1908, p219

[416] MOHAMMED

[417] BERTHIER, 1908, p224-233

[418] HERSKIND & MORACKM, 1987

[419] HERSKIND & MORACKM, 1987

[420] BERTHIER, 1908, p234

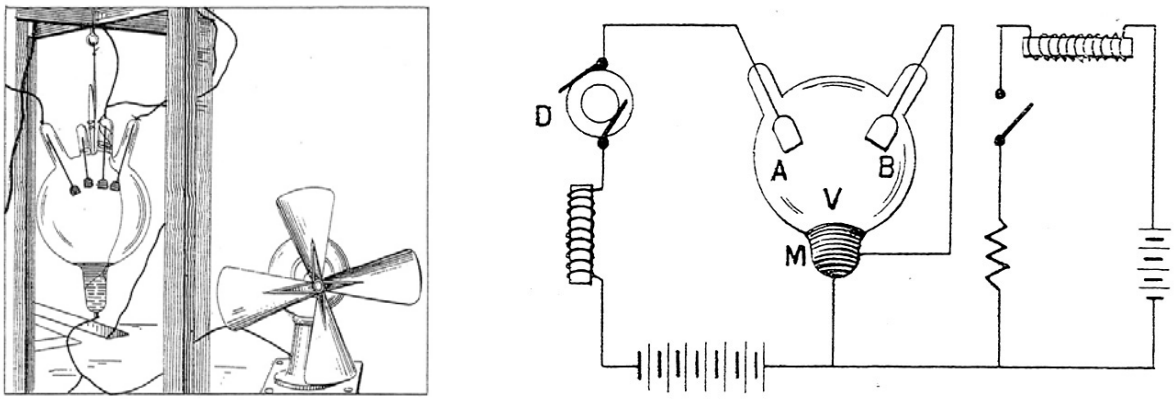


Fig.28 – Premier redresseur fabriqué par Peter Cooper Hewitt [421]

Les premiers appareils développés s'emploient à une tension de 100 à 1000 volts et jusqu'à un courant de 100 ampères. Le courant redressé a une intensité de 6 à 30 ampères et une tension de 80 à 115 volts[422].

4.2.1.3 Période de production

La période de production et de commercialisation des lampes ainsi que des redresseurs à vapeur de mercure commence, en 1902, avec la collaboration de M. Peter Cooper Hewitt et d'un ingénieur/entrepreneur américain réputé nommé George Westinghouse (1846 – 1914). Ce partenariat donne naissance à la « Cooper Hewitt Electric Company » et à la future « Westinghouse Cooper Hewitt » en Angleterre[423]. La popularité du redresseur à vapeur de mercure fait qu'il prend rapidement la place des méthodes traditionnelles de conversion du courant telles que celles apportées par les groupes moteur-générateurs et les commutatrices. Ce nouvel appareil se voit employé dans divers domaines du secteur public ou industriel tels que l'alimentation des lampes à arc à courant continu, la recharge d'accumulateurs, la télégraphie, la téléphonie, l'alimentation des installations d'électrolyse, etc. Le succès de cette entreprise est tel qu'à partir de 1914, la « General Electric Conpany » (grande entreprise d'électricité anglaise) s'intéresse de très près aux inventions de M. Peter Cooper Hewitt.

4.2.2 CONTEXTE HISTORIQUE

L'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure du musée de la science et de l'industrie provient d'une compagnie anglaise et est acquis à l'origine par le service des transports collectifs de Porto (STCP). Installé et en fonctionnement pendant de nombreuses années dans une des sous-stations (Bras Oleiro) de ce même service, ce matériel est ensuite récupéré par son musée (musée des trams) et finalement légué au musée de la science et de l'industrie. La mise en contexte qui suit est principalement basée sur des informations fournies par le centre de documentation et l'organe de gestion des collections du musée des trams de Porto.

---

[421] BERTHIER, 1908

[422] BERTHIER, 1908, p234-235

[423] MOHAMMED

4.2.2.1 Le service des transports collectifs de Porto

L'histoire des transports publics de la ville de Porto commence par l'utilisation, en 1870, des voitures de type transport américain, sorte de trams tirés par la force animale. Suite à l'installation de ce nouveau moyen de locomotion, la première compagnie de transport – « Companhia Carril Americano do Porto » – est créée[424]. Grâce à la collaboration avec une autre compagnie de transport – « Companhia Carris de Ferro do Porto (CCFP) » – les premières lignes de traction à vapeur voient le jour en 1878. Une quinzaine d'années plus tard, les deux compagnies fusionnent - gardant la désignation de CCFP - et les premières expériences liées à la traction électrique donnent lieu à une première inauguration publique à la fin de l'année 1895[425]. Ceci favorise l'abandon de la traction animale en 1904 et une dizaine d'années plus tard celui de la vapeur. Ce n'est qu'en 1946 que la compagnie des transports publics de Porto (STCP) voit le jour et avec elle (1959), l'exploration des trolleybus dont l'exploitation durera 38 ans[426]. C'est également entre les mains de la STCP que le réseau des trams électriques atteint sa plus grande extention en 1958. Le courant électrique nécessaire est, à cette époque, produit par la centrale thermoélectrique de Massarelos (futur musée des trams). Plusieurs sous-stations (5), appartenant à cette entreprise, sont en fonction à travers la ville de Porto, afin d'alimenter (transformation du courant) en électricité les diverses portions du réseau des transports électriques[427].

4.2.2.2 Période de fonctionnement de l'appareillage

A l'époque de la reprise de la gestion des transports publics de la ville de Porto par la STCP (1946), le matériel de gestion du courant électrique (sous-station) se trouve dans un état de conservation précaire. Dans le but de l'améliorer et de continuer à développer le réseau de traction électrique, certaines modifications matérielles ont lieu dans les sous stations existantes. L'une des principales innovations repose sur le fait que le courant nécessaire ne soit plus produit par la STCP, mais fourni par deux entreprises : la Compagnie Nationale de l'Electricité et l'Union Electrique[428]. Ainsi, la centrale de Massarelos passe du statut de centrale thermoélectrique de production à celui de poste de transformation du courant. Toujours dans l'optique de développer le réseau de traction électrique dans la ville de Porto, du nouveau matériel de transformation du courant est acquis et trois nouvelles sous-stations (Bras Oleiro, Pereiro et Escola Normal), en plus des cinq existantes, voient le jour. La sous-station de Bras Oleiro, dont le projet de construction date de 1948, est connue comme étant la sous-station n°6 et est destinée à la transformation du courant électrique dans le but de répondre aux nécessités d'augmenter le nombre de lignes et de trams en circulation dans la grande zone métropolitaine de la ville de Porto[429]. Ce bâtiment comportait deux étages : un transformateur, un disjoncteur de haute tension ainsi que cinq panneaux de courant continu étaient localisés au rez-de-chaussée alors que le premier étage était équipé d'un ensemble de redresseurs à vapeur de mercure

[424] NOTE INTERNE (MCE) DE M. C. DIAS

[425] NOTE INTERNE (MCE) DE M. C. DIAS

[426] NOTE INTERNE (MCE) DE M. C. DIAS

[427] NOTE INTERNE (MCI) DE BRANCO

[428] NOTE INTERNE (MCI) DE BRANCO

[429] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO

Hackbridge & Hewittic composés de six ampoules de verre d'une puissance de 100 KW chacune, regroupées deux à deux dans trois armoires en acier. Cet appareillage fonctionnera jusqu'en mai 1995[430] et constitue, mis à part le transformateur, l'objet de ce travail. Ce matériel est désormais entreposé au musée de la science et de l'industrie

4.2.2.3 Période d'abandon de l'appareillage

A partir du début des années 1990, la totale disparition des trolleybus et le déclin des trams électriques amènent à la désactivation progressive des sous-stations de transformation du courant électrique. Certaines sont maintenues en activité pour le fonctionnement des dernières lignes existantes, d'autres comme éléments de réserve. Celle de Bras Oleiro est désactivée le 3 mai 1995 et démontée le 21 juillet de la même année[431]. Les équipements ont été en partie détruits et vendus, mais un effort de préservation, mené par le musée des trams a permis de sauvegarder certains éléments clefs de ce patrimoine. Ceci est le cas pour l'ensemble de redresseurs Hackbridge & Hewittic qui a été récupéré par ce même musée. Il n'existe pas d'information précise sur le fait que cet ensemble d'appareil ait été directement emmené au musée après le démantèlement de la sous-station de Bras Oleiro, mais d'après les informations de Mme Margarida Silva (conservateur-restaurateur actuel du musée des trams), ils s'y trouvent depuis au minimum cinq ans. Cet ensemble, composé de trois redresseurs, un ensemble de panneaux électrique ainsi qu'une boîte en bois contenant une ampoule à mercure, est resté pendant ce temps (sans aucune protection) dans un local situé au rez–de-chaussée de la salle de transformation du courant électrique du bâtiment de la centrale de Massarelos (musée des trams) (fig.29 et 30).

Fig.29 – Redresseurs et caisse en bois [432]

Fig.30 – Panneaux courant continu [433]

[430] NOTE INTERNE (MCI) DE BRANCO

[431] NOTE INTERNE (MCI) DE BRANCO

[432] ©MUSÉE DES TRAMS - PORTO

Comme dans la majeure partie du bâtiment, cette salle est directement exposée aux rayons du soleil, à la poussière ainsi qu'a des fluctuations importantes de température et d'humidité relative. D'après les relevés continus effectués par le musée, les écarts de température sont de plus de 30°C annuel et plus de 10°C journalier et les écarts d'humidité relative sont de plus de 80 % annuel et plus de 20 % journalier. Pour des raisons liées à la gestion des collections présentées par le musée des trams (matériel lié aux trams), l'ensemble des redresseurs de la sous sous-station de Bras Oleiro (employée pour les trolleybus) est légué, en juin 2005, au musée de la science et de l'industrie de Porto. L'ensemble se trouve donc, dès lors, dans la réserve de ce musée, local qui se trouve également confronté à des conditions atmosphériques extrêmes, mais qui semblent cependant meilleures que les précédentes (local non exposé à la lumière directe, températures plus basses et moins fluctuantes).

4.2.2.4 Historique du musée de la science et de l'industrie

Le bâtiment du musée de la science et de l'industrie est né d'une longue histoire lié à l'investissement et au développement industriel d'une zone périphérique de la ville de Porto (Freixo) située en bordure du grand fleuve (Douro). Le palais du « Freixo », construit durant la première moitié du 18e siècle, est un des bâtiments clefs de l'investissement de cette zone et reste encore aujourd'hui un édifice prestigieux. Suite à la succession de divers résidents de la noblesse et bourgeoisie portugaise, la première activité industrielle est lancée au milieu du 19e siècle par António Affonso Vellado (négociant) sous l'appellation de « Fabrique du Freixo »[434]. Cette fabrique, fonctionnant grâce à la force de la vapeur, produit des savons et savonnettes d'une grande qualité dont la réputation traverse les frontières portugaises et donne lieu à la compagnie « C.ª de Saboaria do Porto » (compagnie de savonnerie de Porto), en 1866. Quelques années plus tard (1873), des installations permettant la distillation de l'eau de vie et la fabrique de la bière sont additionnées à la zone du Freixo par la société anonyme Peters & C.ª[435]. En 1890, suite à diverses successions des terrains et fabriques du Freixo, une société anonyme destinée à l'industrie de mouture de la céréale est créée par un groupe de négociants : « Companhia de Moagens Harmonia » (Les Moulins Harmonie). Le bâtiment central de cette entreprise est construit en 1891, juste à côté du palais (fig.31), et constitue aujourd'hui les locaux du musée de la science et de l'industrie. Après presque un siècle d'activité, dont 46 ans sous la direction de la famille Apelt (Ingénieurs allemand), la compagnie est transférée, en 1969, dans un nouveau bâtiment construit à côté de l'ancien (fig.31a), ce dernier ne servant plus alors que de cantine et d'entrepôt[436]. L'association pour le musée de la science et de l'industrie est fondée, en 1993, par la Chambre Municipale de Porto et l'association d'entreprises de Portugal dans le but de créer le musée de la science et de l'industrie. Ce dernier est installé dans les anciens locaux de la compagnie « Moagens Harmonia » à partir de 1997[437].

---

[433] ©MUSÉE DES TRAMS - PORTO

[434] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO

[435] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO

[436] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO

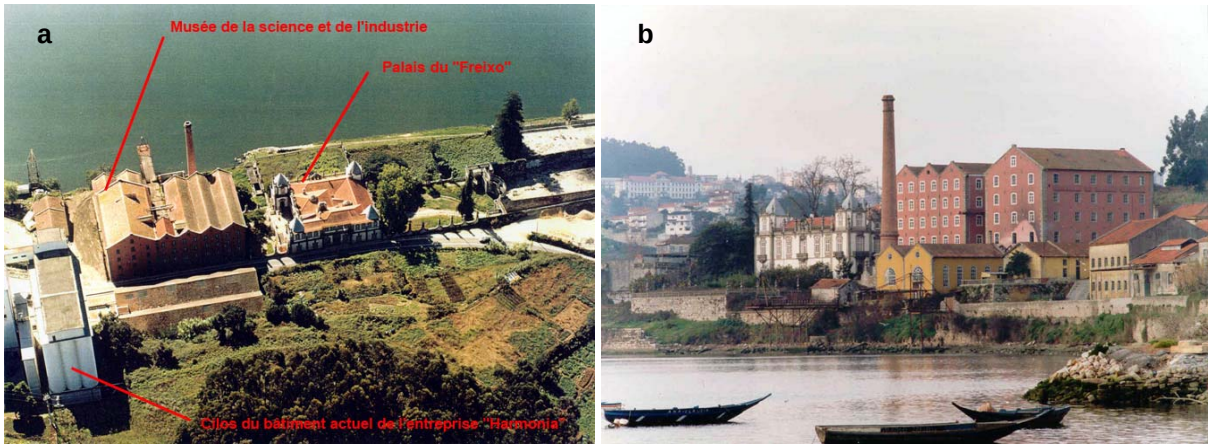


Fig.31 – Vue aérienne (**a**)[438] et latérale (**b**)[439] du bâtiment du musée de la science et de l'industrie et du palais du « Freixo »

L'objectif principal du musée de la science et de l'industrie est aujourd'hui de promouvoir la connaissance du patrimoine industriel de la ville de Porto, dans son contexte socioculturel, économique, géographique ainsi que scientifique[440]. Les collections sont développées sur la base des activités industrielles clefs de la ville de Porto et du matériel récupéré suite à la cessation ou à la modernisation de ces dernières. Ces collections sont divisées en plusieurs thèmes, le plus représentatif étant l'industrie du minotage (exposition permanente) dont l'histoire est intimement liée au bâtiment du musée[441]. Les autres collections tournent autour des domaines de l'industrie du textile, de la métallurgie, de la tannerie, de la chimie, de la céramique, de l'allumette et de l'enseignement industriel[442]. Une dernière catégorie, en cours de développement, porte sur le domaine de l'électricité dont fait partie l'ensemble de redresseurs à vapeur de mercure étudié dans le cadre de ce travail. Les appareillages présentés et conservés au musée de la science et de l'industrie constituent à la fois un patrimoine local (intimement lié à certaines applications industrielles) et international du fait de la multiplicité des pays où ont été développés ce matériel (Angleterre, Allemagne, France, Suisse, Hongrie, etc.). Aujourd'hui, un projet pour l'installation d'un hôtel de luxe, dans le bâtiment actuellement occupé par le musée de la science et de l'industrie, a été approuvé. Le musée fait de son mieux pour poursuivre ses activités et objectifs, tout en attendant les décisions concernant son futur lieu d'implantation, prises par son principal fondateur (Chambre Municipale de Porto), également responsable du projet concernant le futur hôtel de luxe.

---

[437] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO

[438] ©Luis Ferreira Alves

[439] ©JOSE SOARES

[440] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO[2]

[441] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO[3]

[442] NOTE INTERNE(MCI) DE BRANCO ET SAMPAIO[3]

4.2.3 APPROCHE PRATIQUE DE L'APPAREILLAGE

L'inventaire des divers éléments et des matériaux constituant l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure est donné dans la description technique présentée ci-dessous. Par la suite on aborde les risques potentiels causés par la présence du mercure dans les conditions spécifiques de conservation de l'appareillage. La gestion du risque reposera sur la mise en place des mesures de conservation-restauration minimum nécessaires ainsi que sur le développement d'une documentation propre relative à la problématique de la présence de mercure dans cet appareillage pour la base de données du musée.

4.2.3.1 Description technique

L'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure du musée de la science et de l'industrie (fig.32) consiste en trois armoires en acier contenant les ampoules en verre (A) qui constituent les unités de redressement du courant électrique, une caisse de transport en bois d'origine contenant une ampoule en verre (B), trois panneaux électriques de gestion du courant de sortie (C), quatre panneaux électriques de contrôle (D) ainsi que d'un ensemble de cinq ventilateurs (E). Ces derniers étaient placés en dessous de chaque ampoule et étaient directement connectés au circuit du redresseur, afin de gérer automatiquement la température de fonctionnement des ampoules.

Fig.32 – Eléments constituant l'ensemble de redresseurs à vapeur de mercure du musée de la science et de l'industrie : **A** unité de redressement (3x), **B** caisse d'origine avec ampoule (1x), **C** panneau de gestion du courant électrique de sortie (3x), **D** panneaux électriques de contrôle (4x) et **E** ventilateurs (5x) [443]

[443] ©TARCHINI

Chaque armoire en acier constitue une unité de redressement du courant électrique et est composée d'une structure en acier recouverte de plaques en acier pleines ou grillagées (assemblées par vissage). Une peinture grise recouvre le tout. Chacune de ces unités comporte, comme éléments principaux, deux ampoules en verre à trois bras anodique d'une puissance de 600 KW. Une des armoires ne possède qu'une seule ampoule, la deuxième étant stockée dans la caisse en bois. Les autres éléments consistent en du câblage, des résistances, fusibles, condensateurs et autres composés électriques qui entrent dans le fonctionnement des redresseurs et que l'on retrouve souvent dans le matériel électrique.

Les autres matériaux présents sur l'ensemble des redresseurs (panneaux électriques compris) sont communs à tout matériel électrique. Il s'agit de polymères, de caoutchouc, de céramique, de tissu (isolation câblage), de cuivre (câbles électrique) ainsi que de certains métaux (base cuivre). Le bois est également présent au niveau de la caisse comportant une ampoule en verre ainsi que les ventilateurs (pâles). Les panneaux d'avertissement fixés sur la boîte en bois sont en papier.

Chaque ampoule en verre est posée sur une structure en acier peinte en noir (fig.33) qui est elle-même posée sur deux rails soudés à la structure de l'armoire.

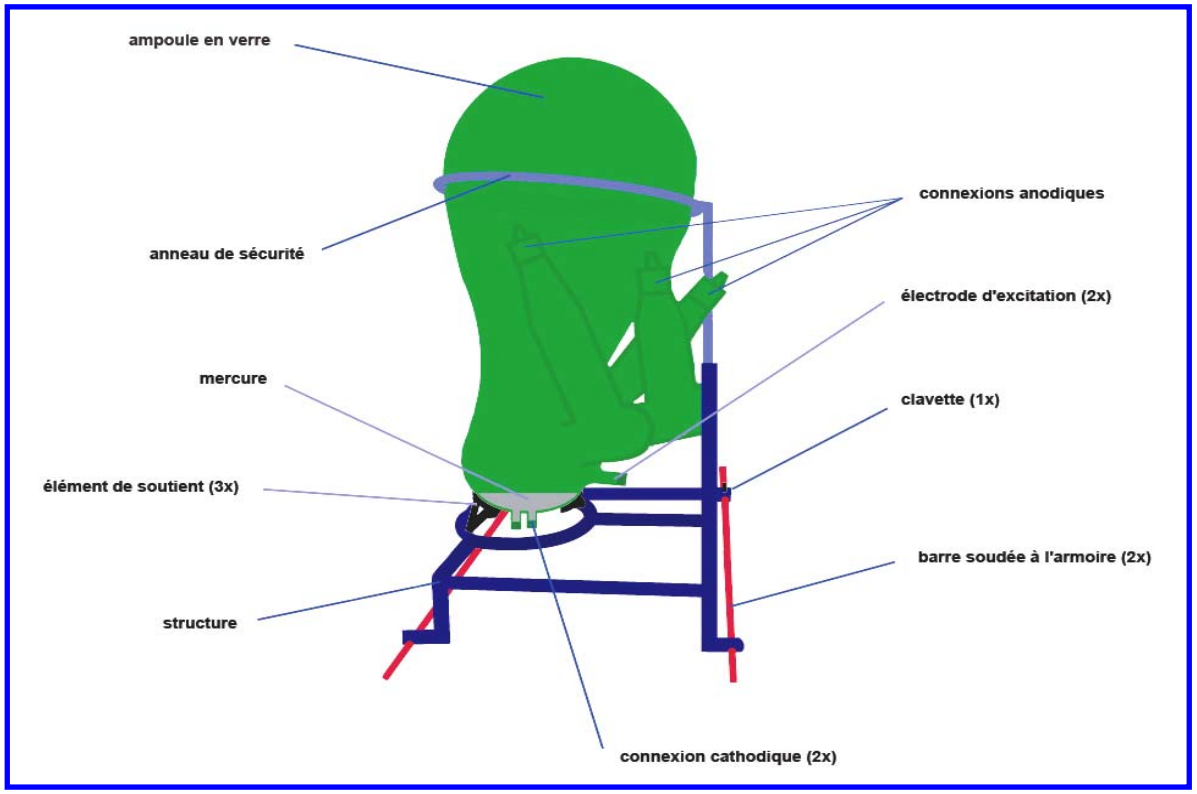


Fig. 33 – Ampoule en verre posée sur sa structure en acier [444]

[444] ©TARCHINI

L'ampoule est simplement posée sur les éléments de soutien de la structure en acier qui à eux seuls supportent la totalité du poids de l'ampoule (environ 20 Kg). Ces derniers, constitués d'acier, sont isolés de l'ampoule en verre par une épaisseur de caoutchouc recouverte d'un textile élaboré à base d'amiante. L'anneau de sécurité sert uniquement à maintenir l'ampoule en place (verticale) durant toute la durée de l'utilisation de l'appareil. Cet élément est fermé à l'aide d'un système de tendeur muni d'un ressort et peut être facilement ouvert. Une électrode de démarrage, non représentée sur la figure 33, est située juste en dessous des électrodes d'excitations. Le système d'amorçage employé pour ces ampoules est celui développé par la société Hakbridge & Hewittic, décrit dans la section 4.1.3 (Description technique) et représenté sur la fig.21 (p.70). La structure en acier et l'ampoule peuvent être sorties de l'armoire, en une seule pièce, en retirant d'abord la clavette (fig.33), en dévissant les attaches situées aux endroits où les pieds de la structure reposent sur les barres de l'armoire et en déconnectant les connexions électriques (câbles) de la structure (non représentées sur la fig.33). Le tout est ensuite simplement glissé (sur les barres) vers l'extérieur de l'armoire et finalement soulevé puis sorti de cette dernière.

Les ampoules en verre sont normalement constituées de vide, étant donné qu'un vide poussé (nécessaire au fonctionnement) est créé à l'intérieur pendant le processus de fabrication. Celles-ci comportent également une certaine quantité de mercure (~ 700mL) situé dans leur base (fig.34).

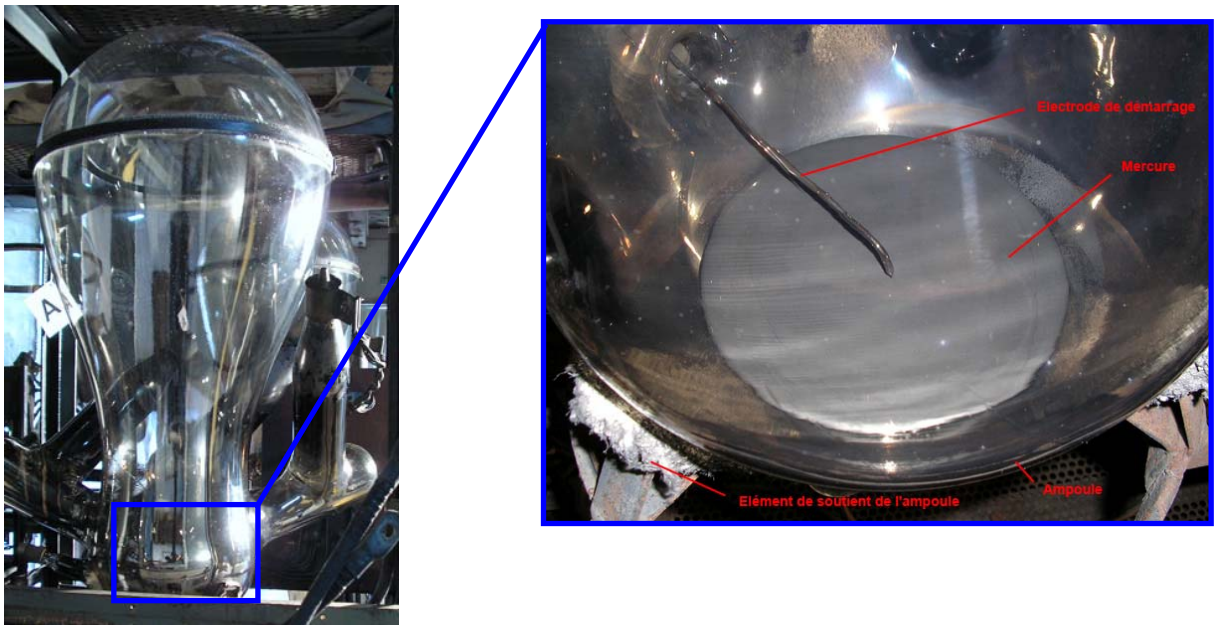


Fig.34 – Ampoule en verre (après nettoyage) avec détail sur la base contenant le mercure [445]

[445] ©TARCHINI

4.2.3.2 Identification du risque

L'identification du risque lié à l'ensemble des redresseurs à ampoules de verre Hackbride & Hewittic repose sur l'étude de trois principaux aspects : la présence de mercure, l'environnement de stockage ainsi que l'état de conservation des matériaux.

La présence de mercure est une composante indispensable pour l'évaluation et la gestion du risque. Ce matériau étant l'objet de la problématique posée, les informations concernant les quantités, la répartition, la situation ainsi que l'aspect permettent d'identifier les conséquences possibles de la présence de mercure dans le musée et de prendre les mesures nécessaires pour limiter le risque. La quantité exacte de mercure présente dans une des ampoules de verre a pu être déterminée suite à l'intervention décrite dans le section 4.2.4.2 (Gestion du risque) et correspond à environ 700mL. En considérant les cinq ampoules montées sur les armoires des redresseurs et l'ampoule stockée dans sa boîte d'origine, la quantité totale de mercure présente dans la réserve du musée de l'industrie devrait s'élever à 4200mL (6 x 700 ml), soit 4,2 litres. La masse volumique du mercure étant de 13,534 g/cm^3, cette quantité correspond à une masse de 56.8 Kg. Les armoires n° 2 et 3 contiennent chacune deux ampoules, l'armoire n°1 n'en contient qu'une seule et une ampoule est stockée séparément dans sa boîte d'origine. Le mercure n'occupant qu'une petite partie du volume total de l'ampoule, l'espace disponible se trouve saturé en vapeurs de mercure, évaporée de la surface du bain. Dans l'ensemble, le mercure présente un aspect terni en surface qui est sûrement dû au dépôt des résidus de combustion des anodes en graphite durant le fonctionnement et non pas à une oxydation superficielle (voir section 2.2.2.2), étant donné que l'enceinte est normalement exempte d'oxygène.

L'étude de l'environnement de stockage consiste en une investigation des conditions atmosphériques de la réserve dans laquelle se trouve l'appareillage, du bâtiment et finalement de la région où est situé le musée. Le bâtiment du musée de la science et de l'industrie correspond à une architecture de la fin du 19ème siècle (fig.35). Il se caractérise par des murs épais, un grand nombre de fenêtres et des planchers en bois. Sa situation en bordure du grand fleuve de Porto (le Douro) l'expose directement à l'humidité issue de l'évaporation des eaux que l'on retrouve, principalement en hiver, sous forme de brouillard épais. Les fréquentes pluies sont également un signe caractéristique du climat humide de cette région. L'isolation du bâtiment est pratiquement inexistante : fenêtres et portes non parfaitement jointives et laissant passer l'air et l'eau de pluie. Selon le plan présent en annexe 10, le local de réserve où se trouve l'appareillage donne sur la façade est du musée. Cette pièce comporte cinq fenêtres donnant à l'est (fig.36 - encadrement bleu) et trois au nord. L'ensemble des fenêtres de ces deux façades ont été cassées (fig.36), suite a des actes de vandalisme et sont fermées à l'aide de panneaux de bois agglomérés (laissant de nombreux jours) et de rideaux épais. Le mur côté sud de la pièce, contre lequel se trouvent les trois redresseurs, donne sur une petite pièce comportant deux fenêtres qui donnent sur la façade sud et une fenêtre sur la façade est. Cette pièce est fortement exposée aux conditions citées ci-dessus et l'accès entre cette dernière et la réserve est possible grâce à une vieille porte ne comportant pas de système de fermeture. Le manque d'isolation du

bâtiment favorise également l'accumulation de poussières à l'intérieur du musée et de ses réserves. La proximité (bâtiment en face) de l'usine actuelle des « Moagens Harmonia » participe également à la formation de poussières issues de la préparation de la farine qui atteignent facilement le bâtiment du musée et que l'on peut identifier (à l'œil nu) sur les objets.

Fig.35 – Vue sur les façades sud (côté Douro) et est [446]

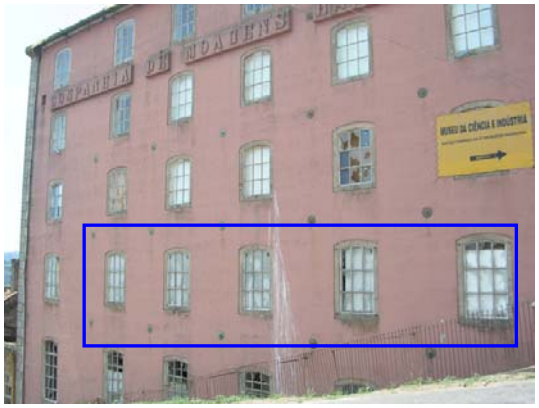


Fig.36 – Façade est avec l'étage correspondant à la réserve encadré en bleu [447]

La réserve étant la salle la plus proche de l'usine, l'accumulation de poussière y est plus importante. La plupart des objets du musée sont protégés par des plastiques ou tissus en coton, ce qui n'est pas le cas pour les appareils appartenant à l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure, sur lesquels des quantités importantes de poussière se sont déposées. Une étude effectuée en 2004, dans le cadre d'un projet d'étudiant en conservation-restauration[448], sur les conditions atmosphériques dans divers locaux du musée démontrent l'importance des fluctuations d'humidité relative à l'intérieur du bâtiment, comparées aux températures qui restent relativement stables. En fait, l'étude de 2004 a été effectuée sur l'ensemble du musée à l'aide d'un seul appareil qui a été déplacé d'une pièce à l'autre. Les mesures disponibles pour la réserve représentent donc une semaine pour la fin février et début mars et une semaine pour la deuxième moitié du mois de mai de l'année 2004. Les résultats obtenus démontrent que les valeurs d'humidité relative peuvent varier en une semaine entre 40 et 72 %, alors qu'une variation de température d'environ quatres degrés est mesurée. Un plus grand écart de température est cependant enregistré entre la fin fevrier (9 °C) et la fin mai (22 °C). Ces mesures ne sont qu'indicatives et ne représentent pas un suivi régulier dans le temps. D'après le personnel du musée, les températures restent fraîches en été en comparaison aux valeurs extérieures. D'après ces observations, on peut dire que la réserve du musée de la science et de l'industrie ne rempli pas les exigences requises en matière de condition atmosphérique dans ce domaine. Malgré cela, les objets présent depuis longue date ne semblent pas trop souffrir de ces conditions.

[446] ©JOSE SOARES

[447] ©TARCHINI

D'après le plan (annexe 10) détaillant la salle de la réserve principale du musée de la science et de l'industrie, les éléments de l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure ne sont pas regroupés dans une seule zone de la réserve, mais sont répartis dans cette dernière. Les trois redresseurs (n°1, 2 et 3) sont regroupés contre la paroi sud de la pièce (fig.37). A partir de cette zone, les autres éléments (ampoule (n°4), ventilateurs (n°12), tableaux électriques (n°5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) sont répartis jusqu'à la paroi nord de la réserve. L'ensemble de l'appareillage se trouve dans cette disposition depuis le mois de juillet 2005, période durant laquelle les objets ont été transférés du musée des trams au musée de la science et de l'industrie. La stabilité de certains appareils est précaire. Dans l'ensemble, les planchers en bois ne constituent pas un bon moyen d'absorption des vibrations, mais permettent au contraire de les transmettre plus facilement. Ainsi, le simple fait de marcher à proximité des appareils est une source de vibration importante. Chaque armoire est disposée sur une palette en bois. Cette palette étant trop étroite pour soutenir l'armoire entière dans le sens de sa longueur, des plots en bois ont été disposés sous la partie suspendue dans le vide. Le cas de l'armoire n°2 est un peu différent puisque la palette est disposée au milieu. Les deux extrémités étant dans le vide, ce redresseur est particulièrement instable (fig.38).

Fig.37 – Les trois armoires des redresseurs [449]

Fig.38 – Base de l'armoire n°2 : le centre uniquement repose sur une palette [450]

Les conditions de l'environnement de stockage dans lesquelles se trouve l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure correspondent donc à la situation suivante : température plutôt stable sur de courtes périodes mais variables annuellement, humidité relative fluctuante atteignant des valeurs élevées, forte concentration de poussières et présence de vibrations.

[449] ©TARCHINI

[450] ©TARCHINI

L'identification du risque lié à la présence de mercure dans l'appareillage du musée de la science et de l'industrie dépend également de l'état de conservation des matériaux. Toute dégradation augmente le risque de fragilisation de certains éléments, ou de l'appareillage dans son ensemble, et par la même occasion le risque de contamination liée à la présence de mercure. Les paragraphes suivants visent à identifier et énumérer les dégradations existantes et potentielles. La première phase consiste en la description des dégradations directement visibles, sans intervention sur les objets. Dans une deuxième phase, certaines interventions sont nécessaires, afin de pousser plus loin l'investigation. Après une première observation de l'appareillage, il a été déterminé que l'empoussièrement important et uniformément réparti sur l'ensemble des éléments constitue une altération environnementale importante (fig.39). Cette altération est très facilement observable sur les ampoules en verre (surfaces lisses) sur lesquelles le dépôt de poussière couvre les parties horizontales retenant plus facilement celle-ci (fig.39 – bras en verre). La chambre de condensation de ces ampoules présente la plus forte concentration de poussière.

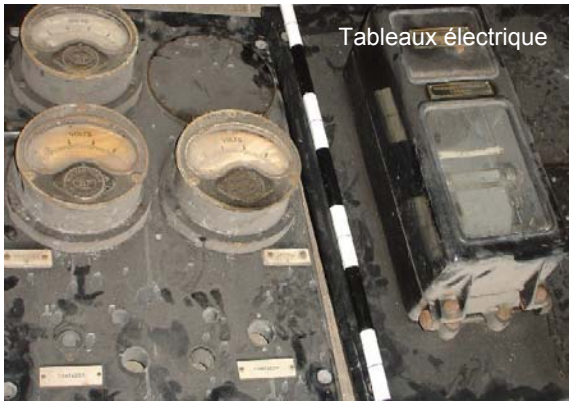


Fig.39 – Empoussièrement sur les divers éléments de l'appareillage [451]

[451] ©TARCHINI

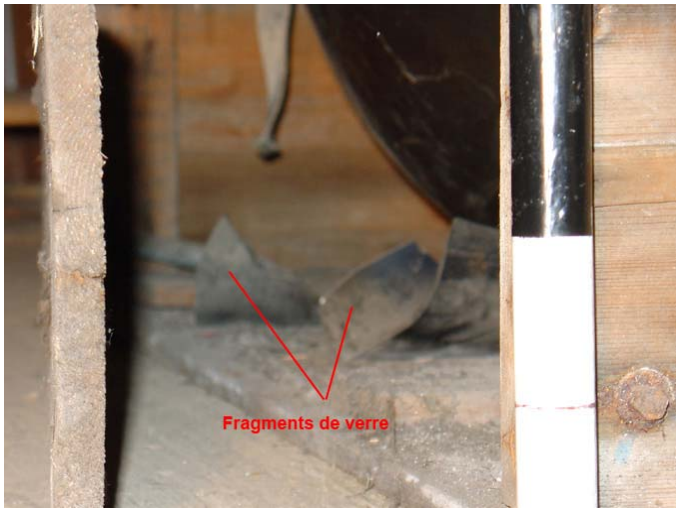


Fig.40 – Caisse de l'ampoule en verre [452]

Fig.41 – Déchaussement d'une planche du bas de la caisse [453]

La caisse en bois comporte une ampoule en verre identifiable au travers des grillages latéraux (fig.40) ainsi que par le déchaussement d'une des planches inférieures constituant la caisse (fig.41). Cette ouverture permet d'identifier la présence de fragments de verre au fond de la caisse ainsi que la présence importante de poussière. La possibilité que l'ampoule soit fracturée est fortement envisagée. Certaines interventions sont à présent nécessaires pour poursuivre l'investigation liée à l'état de conservation de l'appareillage. Une première intervention permettant donc de favoriser l'accès visuel et physique à l'appareillage consiste au démontage des plaques frontales de protection existantes. Certaines plaques étant absentes, le démontage n'a été effectué que sur les éléments suivants : uniquement un côté pour les redresseurs n°1 et 2 et les deux côtés pour le redresseur n°3 (fig.37, p103). Ces plaques de protection sont fixées à l'aide de deux types de vis : à tête plate fraisée pour les plaques grillagées et à tête ronde pour les plaques pleines. La plupart des rainures de tête de vis ont été nettoyées (présence de peinture) à l'aide d'un morceau de lame de scie à métaux, afin de pouvoir introduire correctement le tournevis et de limiter ainsi la dégradation des rainures. Certaines vis ont opposé de la résistance au démontage, ce qui a poussé à l'utilisation d'un dégrippant/lubrifiant (WD-40) et d'un tournevis spécialement adapté à la forme des rainures de vis (fig.42b). En effet, certaines d'entre elles étant fragiles et déjà déformées (fig.42), un tournevis mal adapté éliminerait définitivement toute possibilité de démontage. Une vis trop déformée a dû être sacrifiée (fig.43) ; la tête a été percée, afin de permettre le démontage de la plaque. Dans l'ensemble, les vis ont pu être éliminées sans dégât majeur. La perte d'une vis n'a pas pu être évitée, mais ceci est justifié par la nécessité de démontage. Les plaques et les vis ont ensuite été déposées et étiquetées, afin de garder en mémoire la disposition correcte pour le remontage.

[452] ©TARCHINI

[453] ©TARCHINI

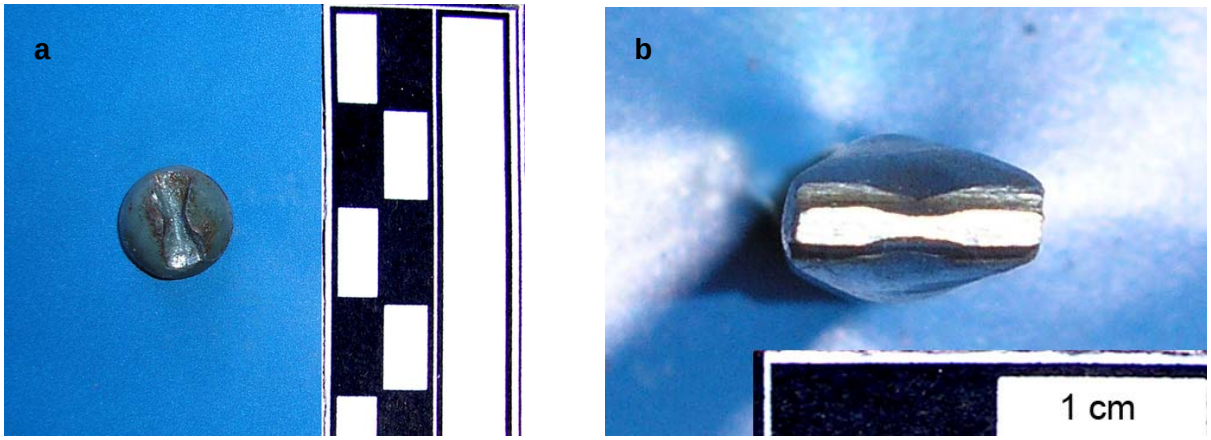


Fig.42 – Rainure de vis déformée (**a**) et tourne vis spécialement adapté pour le démontage (**b**) [454]

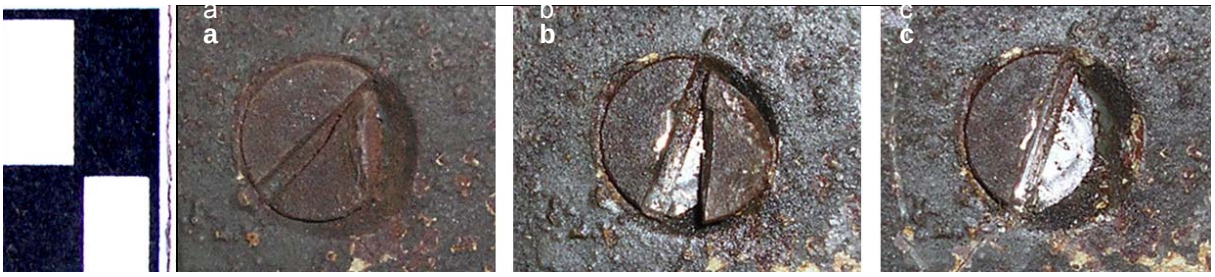


Fig.43 – Tête de la vis sacrifiée : **a** - état original ;**b** - après essais de démontage ;**c** - demi tête de vis éliminée [455]

La deuxième intervention nécessaire à la poursuite de l'investigation liée à l'état de conservation de l'appareillage consiste en l'ouverture du couvercle de la boîte en bois comportant l'ampoule cassée. Ce dernier est fixé à la boîte à l'aide de quatre vis (deux sur la face gauche et deux sur la face droite). Il existe normalement huit vis. L'absence de ces éléments démontre donc que la boîte à déjà été une fois ouverte et qu'il ne s'agit donc sûrement pas d'une ampoule non utilisée (hypothèse confirmée après ouverture – voir ci-dessous). Une fois les vis retirées, le couvercle est facilement retiré (2 personnes) en le tirant vers le haut.

Suite aux interventions décrites ci-dessus, permettant un accès à l'ensemble de l'appareillage, le constat d'état de conservation peut être approfondi. Ce constat est divisé en quatre groupes, en fonction du type d'élément, de leur constitution et des problématiques rencontrées.

- ❶ Ampoules de verre (verre, connections métalliques) ;
- ❷ Structures, supports et visserie ;
- ❸ Caisse en bois ;
- ❹ Tableaux électriques, ventilateurs.

[454] ©TARCHINI

❶ Après ouverture de la caisse en bois comportant l'ampoule en verre, deux altérations majeures sont identifiées : une quantité très importante de poussières, principalement concentrées sur les parties de l'ampoule exposées vers le haut et le fond de la boîte ainsi que la rupture de l'avant bras central de l'ampoule (fig.44). Le bras anodique cassé (fig.45a) se trouve déposé dans le fond de la boîte ou l'on peut observer également quelques fragments de verre (fig.45b). Le bras en verre cassé présente, à l'intérieur (fig.45c), une pellicule noire, lisse et friable de quelques centièmes de millimètres d'épaisseur.

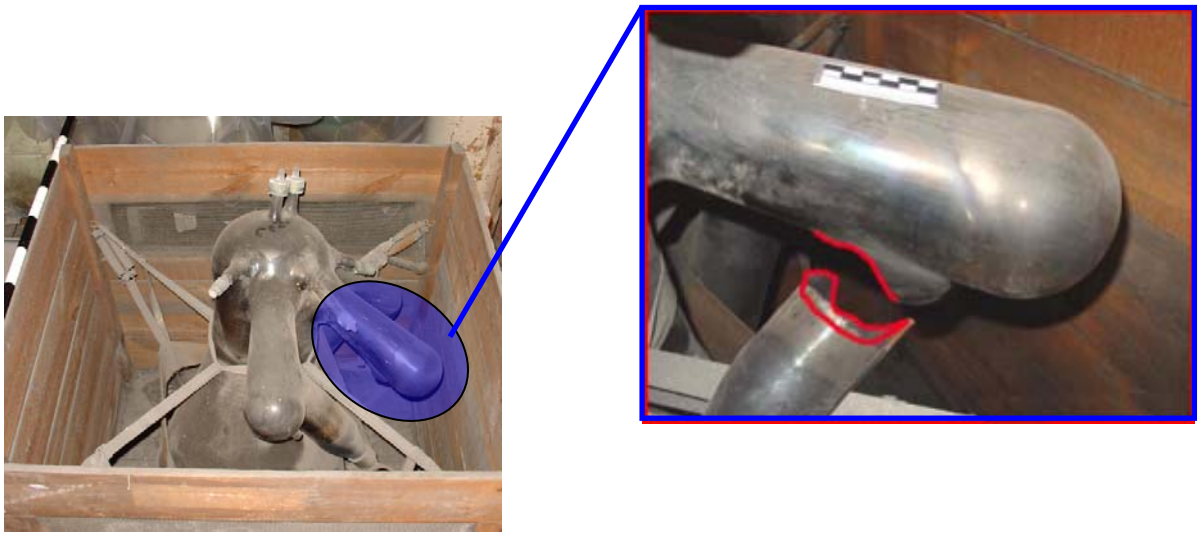


Fig.44 – Ampoule en verre cassée au niveau de l'avant bras du bras central[456]

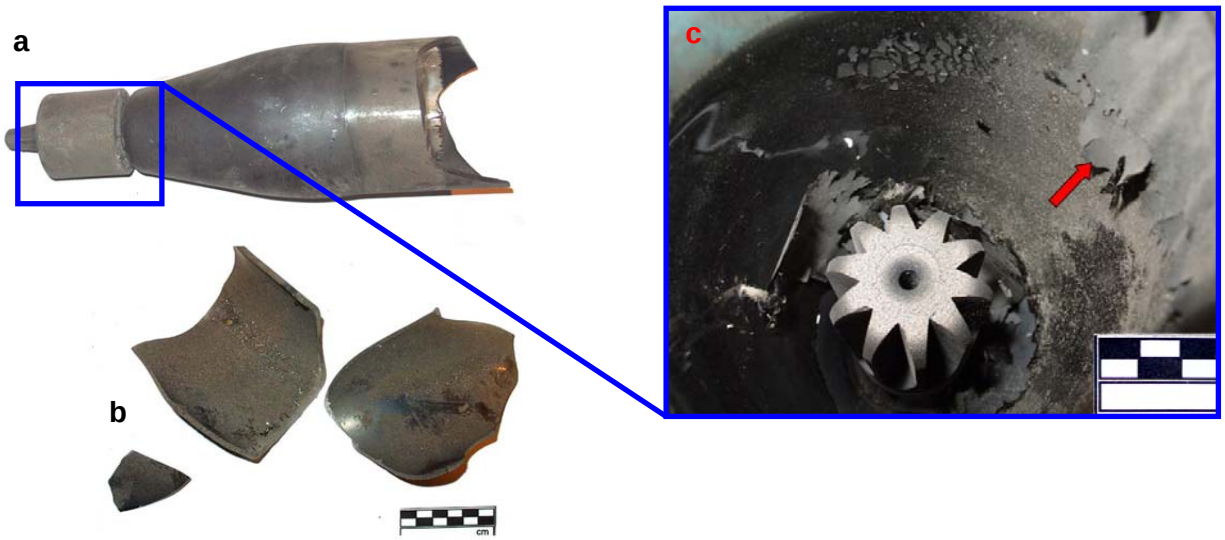


Fig.45 – Bras en verre cassé (**a**), fragments (**b**) et vue intérieure de l'anode (**c**)[457]

[455] ©TARCHINI

[456] ©TARCHINI

Cette pellicule semble être le résultat d'une réaction existante durant le fonctionnement de l'appareil et est observable (à travers le verre) dans les autres extrémités des bras en verre de l'ampoule (fig.46).

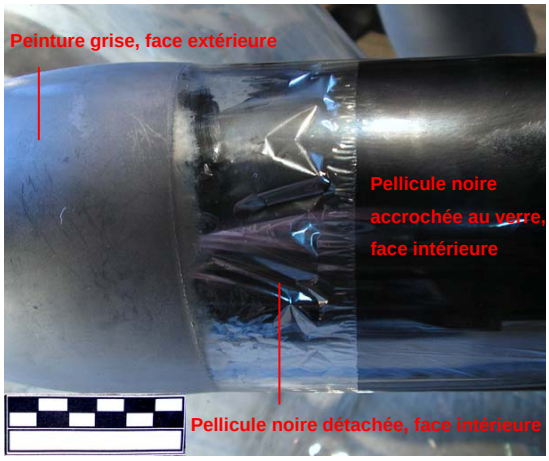


Fig.46 – Avant bras anodique [458]

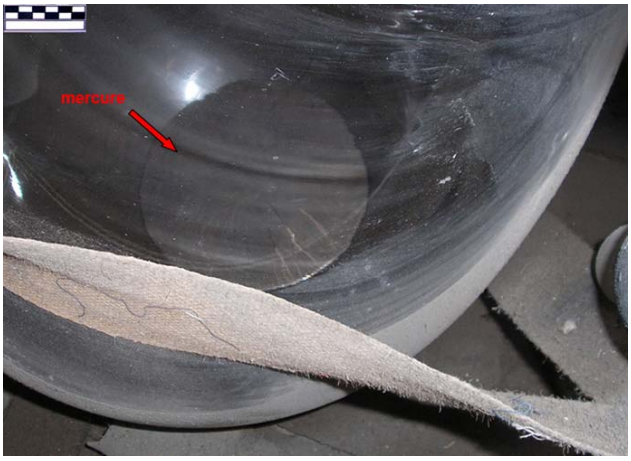


Fig.47 – Mercure identifié dans le fond de l'ampoule cassée [459]

L'électrode représentée sur la figure 45c étant en graphite et l'ampoule étant saturée en vapeur de mercure pendant le processus de fonctionnement, cette pellicule noire contient probablement du mercure ainsi que du carbone (constituant essentiel du graphite). Cette observation démontre que l'ampoule a déjà fonctionné et a été démontée pour une raison non encore identifiée, d'une armoire de redresseur, peut-être l'armoire n°1 du musée de la science et de l'industrie. Après observation à l'œil nu des fragments en verre (fig.45b), il a pu être conclu que la pellicule noire est de quelques centièmes de mm et peut être très fortement fixée à la surface (fig.48). Cette altération sera discutée dans la section suivante (4.2.3.3). Ce premier examen permet d'identifier la présence de mercure, dans la partie inférieure de la chambre de condensation de l'ampoule entreposée à l'envers (fig.47). En ce qui concerne les ampoules des trois armoires, aucune altération majeure n'est identifiée après une première observation. Cependant, l'importance des poussières rend difficile tout constat précis de l'état de conservation de ces éléments. Après un dépoussiérage de l'ensemble de l'appareillage, décrit dans le chap. 4.2.3.4 (gestion du risque), certaines altérations ont pu être identifiées. Dans l'ensemble, les ampoules présentent un ternissement intérieur principalement concentré au niveau des zones cathodiques (en dessus du bain de mercure) et anodiques (embouchures des bras en verre). Sur la partie extérieure, les ampoules (principalement celles du redresseur n°3) présentent des dépôts jaunâtres translucides (fig.49) qui sont concentrés dans les zones où se trouvent les inscriptions du fabriquant (marque, numéro de série), mais qui s'étendent sur une surface relativement importante (plusieurs dm^2). D'après des tests effectués, ces dépôts n'ont pas attaqué le verre et sont facilement solubles dans l'éthanol. Les bases des ampoules présentent, sur la face extérieure, des

[457] ©TARCHINI

[458] ©TARCHINI

[459] ©TARCHINI

taches blanches (fig.50) qui s'étendent sur une surface comprise entre 1 et 10 cm^2 constituées de petites particules fixées à la surface. Ces taches sont principalement concentrées aux alentours des palettes de suspension des ampoules et en dessous des bras d'électrodes. En ce qui concerne les altérations mécaniques, une fissure est identifiée sur le bras gauche de l'ampoule B du redresseur n°2, au niveau de la soudure entre le bras et l'ampoule. Cette dernière mesure 5 cm de longueur (fig.20).

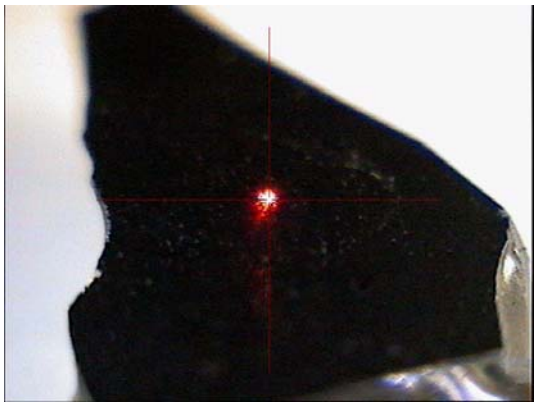


Fig.48 – Pellicule noire sur la surface intérieure d'un échantillon de verre – photo prise avec la caméra de l'appareil de fluorescence x [461]

Fig.49 – Dépôt jaunâtre sur la surface du verre [460]

Fig.50 – Tache blanche sous la base de l'ampoule [462]

Fig.51 – Fissure à la base du bras de l'ampoule n°2 [463]

Les connections cathodiques comportent, dans l'ensemble, une altération (corrosion) de surface dont les produits sont de nature poudreuse et de couleur blanche (fig.52). Les connections anodiques ne présentent pas de dégradation apparente, mise à part celle du redresseur n°2 dont les surfaces sont légèrement recouvertes de produits de nature verte. Certaines connections électriques présentent une poudre blanche relativement dure et friable située à la base, au niveau de l'interface verre/métal (fig.53).

[460] ©TARCHINI

[461] ©UNIVERSITE NOUVELLE DE LISBONNE – CONSERVATION-RESTAURATION

[462] ©TARCHINI

[463] ©TARCHINI

Fig.52 – Corrosion sur les chapeaux des connections cathodiques [464]

Fig.53 – Produit blanc au niveau de la liaison entre le bras en verre et la connexion électrique [465]

❷ Comme décrit dans le chap. 4.2.3.1, les armoires sont principalement composées d'une structure en barres d'acier revêtues de plaques de tôles pleines ou grillagées, le tout recouvert de peinture. Dans l'ensemble, la structure en acier ne présente pas d'altération majeure, à part de petites zones localisées, lacunaires en peinture, où une oxydation de surface s'est développée. Le même type d'altération est observable sur les plaques en acier. Ces altérations sont davantage présentes sur les zones de contact (plaque-bâti, vis-plaque) où la dégradation de la peinture et l'accumulation de poussières et l'humidité sont plus importantes. Les grilles des plaques en acier présentent une déformation (bombées vers l'intérieur) qui est plus importante sur les grilles des plaques supérieures et intermédiaires. La grille de la plaque supérieure du redresseur n°1 (du côté de l'ampoule absente) est déchaussée sur la moitié de ses attaches (fig.54). Ces altérations peuvent être dues au poids des grilles (plaques supérieures), mais semblent également être le résultat d'un phénomène lié au fonctionnement (hautes températures, charges électrostatiques). Ces phénomènes sont certainement responsables aussi de la desquamation de la peinture et de la corrosion généralisée qui touchent l'ensemble des grilles. Cet état de dégradation est plus important sur les grilles de la partie centrale (surtout celle situées à l'est du redresseur n°2 qui constitue le cas extrême (fig.55)).

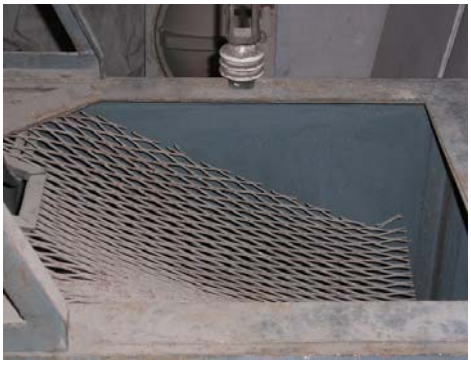


Fig.54 – Grille supérieure du redresseur n°1 [466]

Fig.55 – Corrosion des grillages [467]

[464] ©TARCHINI

[465] ©TARCHINI

[466] ©TARCHINI

Fig.56 – Détachement de la peinture et oxydation des éléments en acier de la structure de l'ampoule[468]

Fig.57 – Corrosions ferreuses d'une des pattes de soutien des ampoules [469]

[467] ©TARCHINI

[468] ©TARCHINI

[469] ©TARCHINI

Les structures en acier (posées dans l'armoire) servant de supports aux ampoules présentent de nombreuses zones de peinture lacunaires et décollées qui se sont oxydées (fig.56). Dans l'ensemble, cette corrosion est de nature plus pulvérulente que ce que l'on trouve sur l'armoire et généralement plus importante sur les zones de contacts de la structure avec d'autres éléments (éléments de fixation, visserie, etc.). Les pattes de soutien des ampoules représentent les cas extrêmes de cette altération (fig.57). La corrosion semble même active. On peut néanmoins remarquer sur la figure 57 que les fils de fer servant à la fixation de l'isolation en amiante ne sont pas corrodés. Les cerceaux de fixation de la partie supérieure des ampoules présentent, d'une manière générale un bon état de conservation. Les ressorts de fixation sont tous légèrement corrodés en surface, mais ne menacent pas de céder. Néanmoins, le cerceau de l'ampoule du redresseurs n°1 est libre (fig.58) et un léger déplacement (1,5 cm) de l'ampoule peut être détecté au niveau des pattes de fixation (fig.59.) Suite à ce déplacement, un des bras en verre est en contact, au niveau du coude avec le panneau de connexion électrique (fig.60). Le cerceau de l'ampoule B du redresseur n°2 est également en train de se libérer et présente une corrosion plus avancée que les autres (fig.61).

Fig.58 – Anneau de fixation libre [470]

Fig.59 – Marque liée au déplacement de l'ampoule [471]

Fig.60 – Contact du bras en verre avec le panneau électrique [473]

Fig.61 – Cerceau de l'ampoule B du redresseur n°2 [472]

[470] ©TARCHINI

[471] ©TARCHINI

[472] ©TARCHINI

[473] ©TARCHINI

Une grande partie de la visserie servant à fixer les plaques sur la structure de l'armoire présente une oxydation superficielle au niveau des filets (fig.62), mais l'ensemble reste réutilisable.

Fig.62 – Oxydation superficielle des filets de la visserie [474]

❸ La caisse en bois est un élément dont l'état de conservation est également important, puisque cette dernière protège une ampoule cassée contenant du mercure, probablement responsable d'une contamination. A première vue, le bois est en bon état de conservation et la seule altération majeure visible est le déchaussement d'une planche latérale située en bas de la boîte (fig.63). Cette altération permet d'observer que les clous sont en mauvais état de conservation : tous cassés et dont la corrosion a laissé des taches brunâtres sur le bois. D'une manière générale, les surfaces sont recouvertes d'une couche importante de poussière qui tapisse également le fond de la boîte (fig.64). Compte tenu de la profondeur de la boîte, de l'accès difficile par la planche déchaussée et de la quantité importante de poussière, il est difficile d'identifier une éventuelle présence de mercure à l'extérieur de l'ampoule (déversement lors de la rupture du bras en verre). Dans tous les cas, la caisse doit être considérée comme contaminée (mercure métallique et/ou vapeurs).

Fig.63 – Déchaussement d'une planche du bas de la boîte en bois contenant l'ampoule cassée [475]

Fig.64 – Empoussièrement généralisé sur l'ampoule cassée [476]

[474] ©TARCHINI

[475] ©TARCHINI

[476] ©TARCHINI

❹ Les tableaux électriques ainsi que les ventilateurs sont des éléments qui ne contiennent pas de mercure en tant que composant lié au fonctionnement. Cependant, ces éléments faisant partie de l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure, ils ont été stockés dans le même local pendant de nombreuses années. Ceci amène à la possibilité d'une contamination de ces éléments par le biais de poussières et/ou déversements de mercure et justifie leur prise en considération dans ce travail d'investigation. L'observation à l'œil nu de l'ensemble des tableaux électriques a permis de démontrer la présence de petites particules de mercure (billes) accrochées à la surface de deux tableaux électriques (faces arrière des tableaux n°6 et 7) et réparties de façon aléatoire (fig.65). Les autres tableaux électriques et les ventilateurs ne semblent pas présenter cette problématique. Ce cas est étudié plus en profondeur dans la section suivante (4.2.3.3).

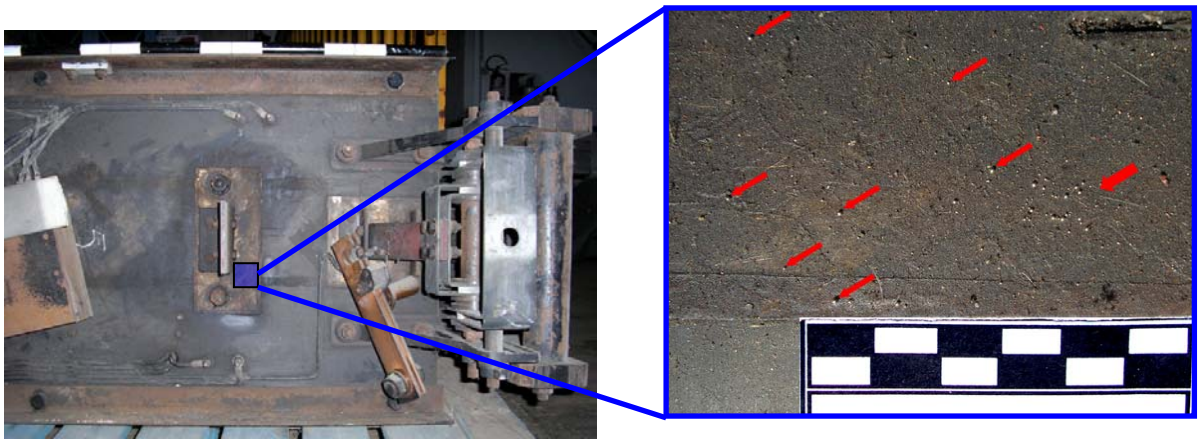


Fig.65 – Billes de mercure identifiées sur la surface du disjoncteur n°6 [477]

4.2.3.3 Evaluation du risque

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les risques liés à la présence de mercure dans cet ensemble de redresseurs. Deux types de risques sont traités : les risques indirects (risques de contamination possible dans le futur) pouvant survenir suite à la présence de mercure et les risques directs (contamination identifiée).

Le premier point qui entre en compte dans l'évaluation des risques indirects est la grande quantité de mercure présente. Une ampoule d'un des redresseurs du musée de la science et de l'industrie contient une quantité de mercure 13'000 à 19'000 fois supérieure à un thermomètre médical (0.5 – 0.7g). La quantité de mercure d'un thermomètre est souvent identifiée comme étant la limite entre un déversement mineur, pouvant être décontaminé par le grand public et un déversement majeur, nécessitant l'intervention d'une équipe spécialisée en décontamination de mercure. Dans certains pays comme les Etats-Unis, un déversement supérieur à 500g (soit 21 fois moins que la quantité d'une ampoule du musée de la science et de l'industrie) doit légalement être reporté à l'instance

[477] ©TARCHINI

compétente. Une ampoule de verre de redresseur du musée de la science et de l'industrie représente donc un risque très important quant à la possibilité de contamination, avec des conséquences d'intoxication pour le personnel/visiteur et des coûts élevés pouvant être engendrés par la décontamination.

Un des principaux risques à prendre en considération pour ces objets est lié au fait que le matériau (verre) constituant le contenant du mercure est fragile et ne constitue qu'une faible protection en cas de choc. D'un autre côté les verres développés pour ce genre d'appareils sont des matériaux résistants aux agressions chimiques, donc peu sensibles aux agents atmosphériques. La présence de vide à l'intérieur de l'ampoule a pour effet de mettre le verre sous contrainte permanente (action de la pression atmosphérique de l'extérieur vers l'intérieur) et donc de diminuer sa résistance mécanique[478]. Il faut prendre en considération que cette particularité peut être responsable de l'implosion de l'ampoule, selon l'intensité et la position du choc. Le mercure présent dans la base de l'ampoule crée, à cause de sa densité, également des tensions mécaniques au niveau de cette zone (électrodes et bras anodiques). Les bras en verre comportant les anodes sont exposés à des contraintes mécaniques, liées à la densité du mercure, pouvant provoquer leurs ruptures en cas d'instabilité de l'appareil. Il faut également prendre en considération que ces derniers ont une soixantaine d'années, qu'ils ont pu être fragilisés par le temps et qu'ils ne possèdent donc plus forcément les caractéristiques mécaniques prévues lors de leur fabrication. D'après une information donnée par un ingénieur ayant travaillé avec ce genre de matériel[479], l'ampoule d'un redresseur subirait des altérations (microfissures, contamination par le mercure) pendant le fonctionnement de l'appareil qui favoriseraient sa fragilisation. La fragilité du contenant du mercure constitue donc un premier risque indirect de contamination.

Le manque d'étanchéité du contenant peut être un deuxième facteur de cause de pollution atmosphérique. Il existe deux principales causes d'une perte d'étanchéité des ampoules. Premièrement, le verre peut comporter des fissures permettant des échanges gazeux entre l'intérieur et l'extérieur (cette caractéristique est directement liée au risque décrit ci-dessus – fragilité du verre). D'autre part, les liaisons verre-métal (connexions électrodes) peuvent ne plus être complètement étanches à cause de la dégradation d'un ou plusieurs constituants de liaison (verre - matériaux liant - métal). Dans le cas où une de ces parties ne remplirait plus son rôle d'étanchéité, l'air ambiant pénétrerait, dans un premier temps, à l'intérieur de l'ampoule jusqu'à ce que l'équilibre soit retrouvé entre l'extérieur et l'intérieur. Dans un deuxième temps, les vapeurs de mercure présentes dans l'ampoule pourraient s'échapper et contaminer l'air ambiant. Finalement, l'étanchéité des ampoules dépend de l'état de conservation de chaque matériau. D'une manière générale, l'état de conservation actuel du verre constituant les cinq ampoules présentes dans les armoires de redresseurs du musée de la science et de l'industrie semble bon. A l'exception de l'ampoule B du redresseur n°2, les ampoules ne présentent pas de fissure visible. Le cas de cette ampoule demande une attention

[478] ACEC, 1954

[479] MARKHAM, MAIL DU 10 DEC. 2005

particulière, car la fissure pourrait constituer une fuite pour la libération de vapeur de mercure et fragilise, dans tous les cas, le bras de cette ampoule, élément considéré comme sensible sur ce type d'objet. La perte d'étanchéité est une question très importante dans le cas de la conservation de ces objets à long terme et une technique permettant de tester l'étanchéité de l'ampoule devrait être développée.

Lors de la fabrication des appareils, les connections électriques de l'ampoule (anodes, cathodes) ont été réalisées pour résister à de fortes contraintes (pression, hautes températures) sur de longues périodes. Néanmoins, ces éléments constituent des sources potentielles de fuite, puisqu'elles représentent un accès entre l'intérieur et l'extérieur de l'ampoule. Contrairement au matériau verre, ces éléments, en métal, sont plus résistants aux agressions mécaniques, mais sont plus sensibles à l'altération chimique (corrosion). Bien que superficielles, les dégradations (corrosions) identifiées sur l'ensemble des connections électriques (principalement les connections cathodiques) représentent donc un risque potentiel de fragilisation qui peut avoir des conséquences, à long terme, sur l'isolation de l'ampoule. La poudre blanche compacte identifiée sur certaines anodes, entre le verre et le métal des connections, devra faire l'objet d'une investigation plus approfondie.

Toute altération liée à des instabilités au niveau des armoires ou des ampoules en verre rend l'ensemble plus vulnérable et constitue un risque supplémentaire de fracture. Ainsi, les ampoules B des redresseurs n°1 et 2 ne sont plus maintenues correctement et sont susceptibles de se déplacer plus facilement durant le transport, par exemple. Le déplacement de l'ampoule du redresseur n°1 pose particulièrement problème puisque le contact du panneau électrique sur le bras en verre crée une pression sur ce dernier. Les bras étant les éléments les plus fragiles de l'ampoule, ce dernier risquerait de se briser si une pression trop forte était exercée sur le panneau. L'instabilité de l'armoire n°2 augmente la possibilité de chocs et vibrations sur les ampoules et ainsi les risques de fractures.

Toute lacune au niveau de la peinture des supports en acier contribue à l'exposition du métal aux conditions atmosphériques et favorise le développement de la corrosion. Dans l'ensemble, les zones ne sont corrodées que superficiellement et ne sont donc pas responsables d'une fragilisation imminente des supports. Néanmoins, ces altérations contribuent, sur le long terme, à la fragilisation d'éléments soumis à des contraintes mécaniques importantes et indispensables au soutien et à la sécurité des ampoules. Les pattes de soutien de la base des ampoules posent un problème plus important. En effet, le processus de corrosion est plus avancé sur ces éléments et ces derniers sont directement soumis aux contraintes mécaniques créées par le poids des ampoules. Bien que ces dernières soient maintenues en place par la masse importante de mercure, le déchaussement de certains cerceaux de soutien supérieurs crée une instabilité pouvant être préjudiciable (changement de position de l'ampoule). Les altérations (peinture lacunaire et corrosion) de la structure et des plaques de protection des armoires ne posent pas un problème imminent dans le sens où elles n'empêchent pas ces éléments de remplir leur rôle protecteur. A long terme, ces altérations peuvent devenir problématiques, principalement en ce qui concerne les grilles des plaques de protection dont

le métal est fortement corrodé et relativement fin. L'effondrement des grilles supérieures représentent également, sur le long terme, un risque pour les ampoules. S'il se produit le même cas que la grille du redresseur n°1, la pression exercée par cette dernière sur l'ampoule pourrait provoquer sa rupture.

D'une manière générale, les conditions environnementales de la réserve (alternance entre faible et forte humidité relative, présence de sels marins, empoussièrement important) contribuent à l'accentuation des phénomènes de corrosion observés sur les éléments métalliques. Le mauvais aspect général de l'appareillage, et tout particulièrement l'empoussièrement important gène l'observation visuelle et empêche la détection d'éventuelles altérations au niveau des ampoules ou autres éléments.

Certaines altérations identifiées posent directement un risque pour l'environnement du musée et la santé du personnel ainsi que de toute personne ayant accès au local dans lequel se trouve l'ensemble de l'appareillage des redresseurs à vapeur de mercure. L'ampoule cassée, stockée dans sa boîte d'origine pose un sérieux problème, car le mercure est directement exposé à l'air ambiant et son évaporation contribue, peu à peu, à la contamination du local. Le travail d'investigation a été limité au maximum jusqu'à l'obtention d'informations confirmant l'inexistence de danger imminent. Sur la base des recherches effectuées et de la visite de M. le professeur Manuel A. M. Fonseca Almeida (professeur en métallurgie et matériaux à la faculté d'ingénierie de Porto), il a été conclu que la situation actuelle de la réserve du musée de la science et de l'industrie ne pose pas de danger direct pour la santé humaine. En effet, les températures relativement basses (max 25°C), tout au long de l'année, et la forte ventilation naturelle diminuent fortement le risque d'évaporation et d'accumulation de vapeur de mercure dans le local. Cependant, ces déductions ne constituent pas une preuve scientifique de l'inexistence de danger et n'empêchent pas la possible présence de fortes concentrations de vapeurs à l'intérieur de la caisse en bois, moins ventilée. Sachant que les vapeurs de mercure sont susceptibles de pénétrer les matériaux poreux, le bois et le textile constituant la caisse doivent être considérés comme contaminés, de même que les poussières présentes dans la caisse et sur la surface de l'ampoule. Le fait que le bris de l'ampoule ait eu lieu il y a plusieurs années (environ 15 ans) et que cette caisse ait été stockée pendant pratiquement toute cette période dans un local où les températures pouvaient atteindre des valeurs élevées (jusqu'à 40°C) augmentent fortement le risque de contamination.

La présence de mercure identifiée sur les tableaux électriques n°6 et 7 (plan en annexe 11) pose plusieurs problèmes et ces éléments doivent être considérés comme fortement contaminés. D'une part, chaque bille de mercure identifiée contribue à l'augmentation de la concentration en vapeur dans l'atmosphère dans laquelle se trouvent les appareils. D'autre part, ces billes risquent de se détacher, lors de manipulation de ces éléments ou de contact avec le personnel du musée, et de contaminer le sol de la réserve en pénétrant dans le moindre petit interstice. Le personnel impliqué dans la manipulation se trouverait également contaminé par la mise en contact des gants, des habits ou des chaussures. Ceci aurait pour effet de transporter des particules de mercure dans d'autres locaux du

musée, voire à l'extérieur du bâtiment (voiture, maison, etc.). L'origine de la présence des ces billes de mercure sur les surfaces de ces deux disjoncteurs est également un aspect important à prendre en considération. En effet, il convient de savoir si ces billes sont le résultat d'un processus ayant eu lieu dans la réserve du musée de la science et de l'industrie ou dans un ancien local de stockage de l'appareillage. A première vue, la cause de la présence de mercure sur ces éléments peut difficilement être considérée comme étant le résultat d'un phénomène local (musée de la science et de l'industrie). En effet, le seul objet contenant du mercure pouvant être responsable de cette altération se trouve relativement éloigné de ces éléments (entre 4 et 10 mètres). De plus, le phénomène est observé sur deux disjoncteurs relativement éloignés (5 mètres), alors que sur deux disjoncteurs disposés l'un à côté de l'autre, un seul présente cette problématique. Le fait que les billes de mercure se trouvent accrochées sur des surfaces verticales démontre que celles-ci ont probablement été déposées lorsque les tableaux se trouvaient dans une autre position et se sont fixées avec le temps (poussières) ou contre des zones grasses.

L'observation de la répartition, de la quantité et des dimensions de ces billes, peut apporter des informations supplémentaires et utiles à l'explication du phénomène responsable de leur présence. D'une manière générale, les billes de mercure sont uniquement visibles sur la partie arrière des disjoncteurs et sont réparties d'une manière aléatoire sur toute la surface, parfois isolées les unes des autres, parfois regroupées. Le schéma présenté en annexe 11 montre la répartition des particules de mercure ainsi qu'une évaluation approximative de leurs quantités. Les zones recouvertes de matières grasses (graisse) comportent davantage de mercure, car ce milieu permet aux billes de coller à la surface. La plus forte concentration est identifiée, pour les deux panneaux, dans la zone où se trouve fixée une plaque en cuivre, zone qui présente la plus forte concentration de graisse. Les plus grandes billes de mercure identifiées sont de l'ordre du millimètre, alors que les plus petites atteignent parfois des valeurs microscopiques qui les rendent difficilement identifiable à l'œil nu. Cette observation amène à penser que les zones où le mercure n'a pas été identifié peuvent également en contenir. Afin de confirmer cette hypothèse, une série d'échantillons de poussière ont été prélevés sur lamelle microscopique pour observation.

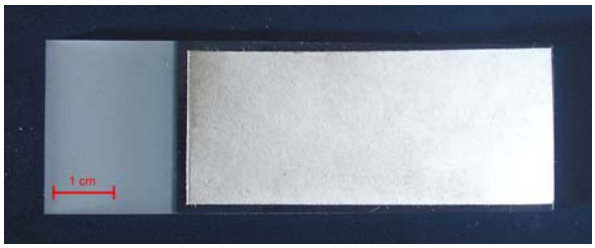


Fig.66 – Etiquette autocollante (contenant la poussière sur son revers) collée sur la lamelle de verre [480]

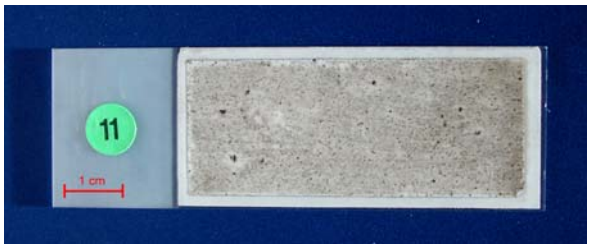


Fig.67 – Lamelle retournée (une deuxième étiquette blanche autocollante permet de maintenir en place l'étiquette portant la poussière) [481]

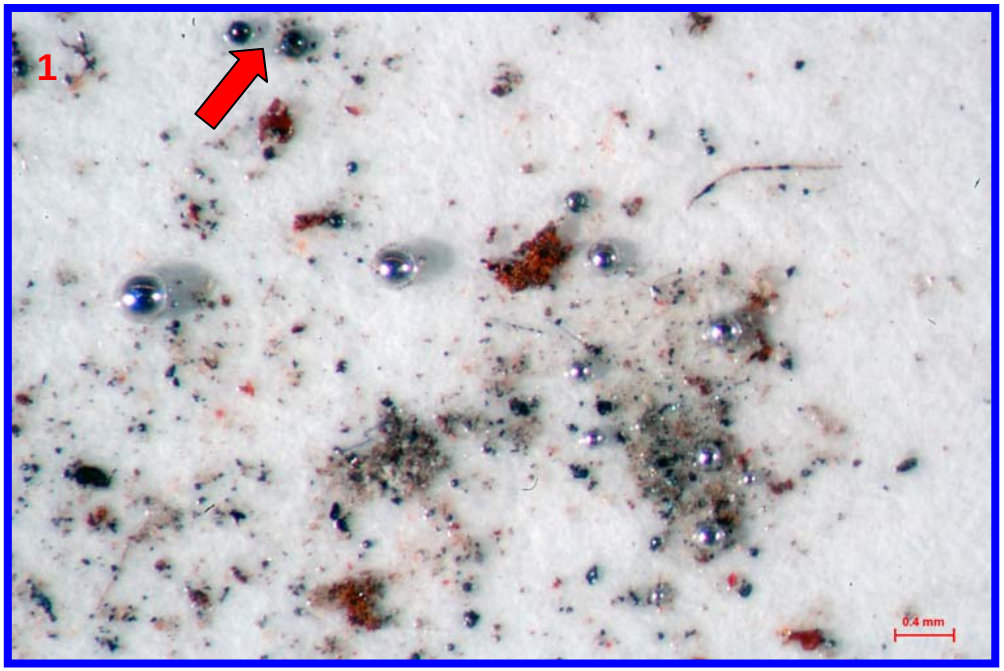
[480] ©TARCHINI

[481] ©TARCHINI

La technique de prélèvement consiste à placer une étiquette autocollante blanche sur la surface poussiéreuse, à la retirer de cette surface, puis à déposer cette dernière sur une lamelle en verre avec bordure dépolie (fig.66). Comme la quantité de poussière est généralement importante et rend difficile la fixation de l'étiquette, après prélèvement, cette dernière est découpée avec des dimensions légèrement inférieures aux dimensions de la lamelle (1-2 mm sur les côtés). Une deuxième étiquette autocollante aux dimensions exactes de la lamelle est ensuite positionnée par-dessus, afin de sceller les bords et d'empêcher le décollement (fig.67). Les positions des prélèvements sont également indiqués sur le schéma de l'annexe 11. La plupart des échantillons sont prélevés sur les zones où le mercure n'a pas été identifié. Deux échantillons par panneau sont réalisés sur des zones contaminées, afin de vérifier également si ces dernières comportent des billes qui sont uniquement identifiables sous agrandissement. Après prélèvement, les vingt échantillons ont été stockés dans deux boîtes pour lamelle de verre. Les échantillons de poussière ont d'abord été observés à la binoculaire puis au microscope. Les images de ces observations sont représentées en pages 116 et 117**.** Les résultats obtenus en fonction de ces deux méthodes diffèrent au niveau des dimensions des particules de mercure identifiées. En dessous du dixième de millimètre la binoculaire ne permet plus d'identifier clairement des particules de mercure (image 1) alors que le microscope (50x, 100x et 200x) permet d'atteindre le centième de millimètre (image 2). Suite aux observations, la présence de mercure est attestée sur l'ensemble des échantillons prélevés sur les panneaux 6 et 7 et il se présente sous deux formes distinctes :

- billes liquides parfaitement sphériques avec un aspect de surface métallique (image 1 et 2). Certaines d'entre elles présentent un dépôt de particules plus au moins important en surface (image 3) ;
- billes sphériques (parfois déformées), de couleur noire dont la surface peut varier d'un aspect brillant à un aspect mat (images 1 et 4, indiquées par des flèches et rectangles rouges). Ces particules sont solides ;

Le premier type de particule (mercure liquide) est identifié sur la plupart des échantillons, à l'aide d'une binoculaire, dans des concentrations variables (entre 5 et 30 billes par lamelle de préparation en verre). Cette évaluation est approximative et augmente considérablement avec l'observation au microscope. Les dimensions de ces particules varient entre 0,3 mm et 0.01 mm. Ces valeurs peuvent être légèrement faussées par l'écrasement des billes de mercure liquide contre la lamelle en verre, suite au collage de l'étiquette (effet observable sur les billes de grandes dimensions). Certains échantillons (2, 3, 8, 9, et 16) ne contiennent pas ce premier type de particule. Le deuxième type de particule (billes solides de couleur noire) est identifiable sur l'ensemble des lamelles microscopiques, dans des proportions bien supérieures aux billes liquides, et parfois identifiables par milliers (image 4). Leurs dimensions varient également entre environ 0.3 mm et 0.01 mm. Ces particules sont parfois déformées et deviennent difficilement identifiables, car leurs formes se confondent avec d'autres types de particules présentes dans les poussières.

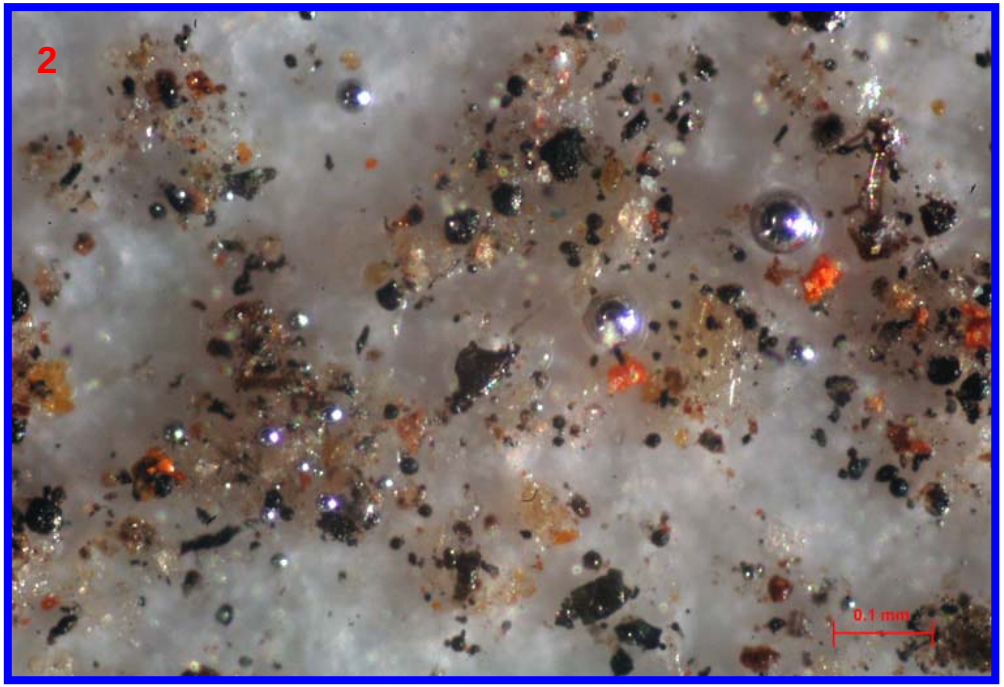


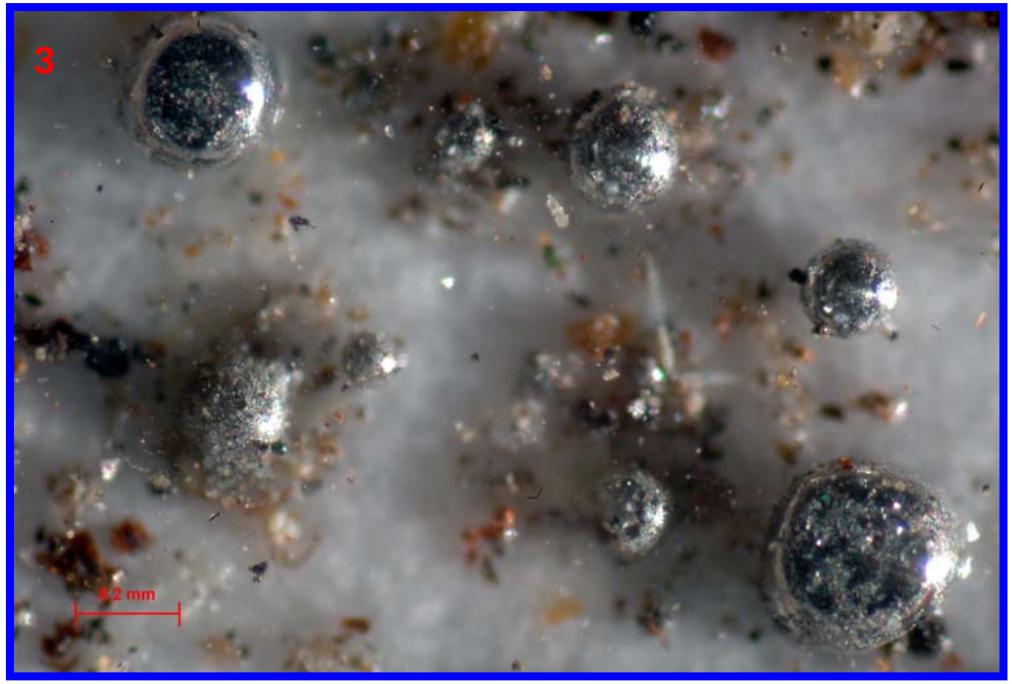
1 : Particules de mercure sphériques et brillantes identifiables jusqu'au dixième de mm (binoculaire 10x). Particules noires sphériques identifiables en haut à gauche

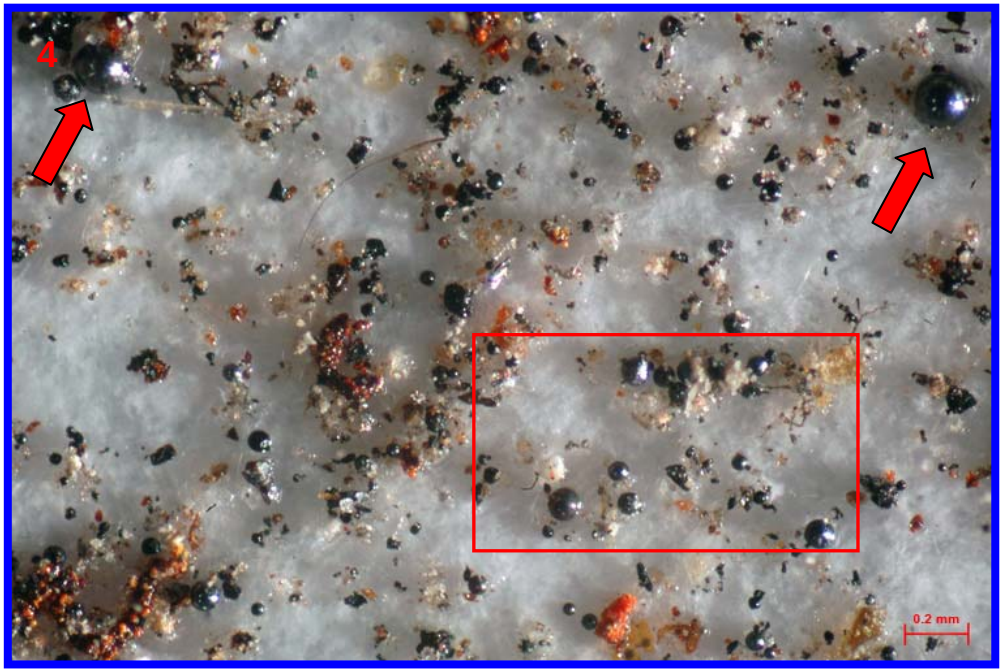
2 : Particules sphériques et brillantes identifiables jusqu'au centième de mm (microscope 50x).

3 : Particules de mercure brillantes (déformées par l'écrasement de l'étiquette contre la lamelle microscopique) qui présentent des dépôts d'autres particules sur leurs surfaces (microscope 100x).

©TARCHINI





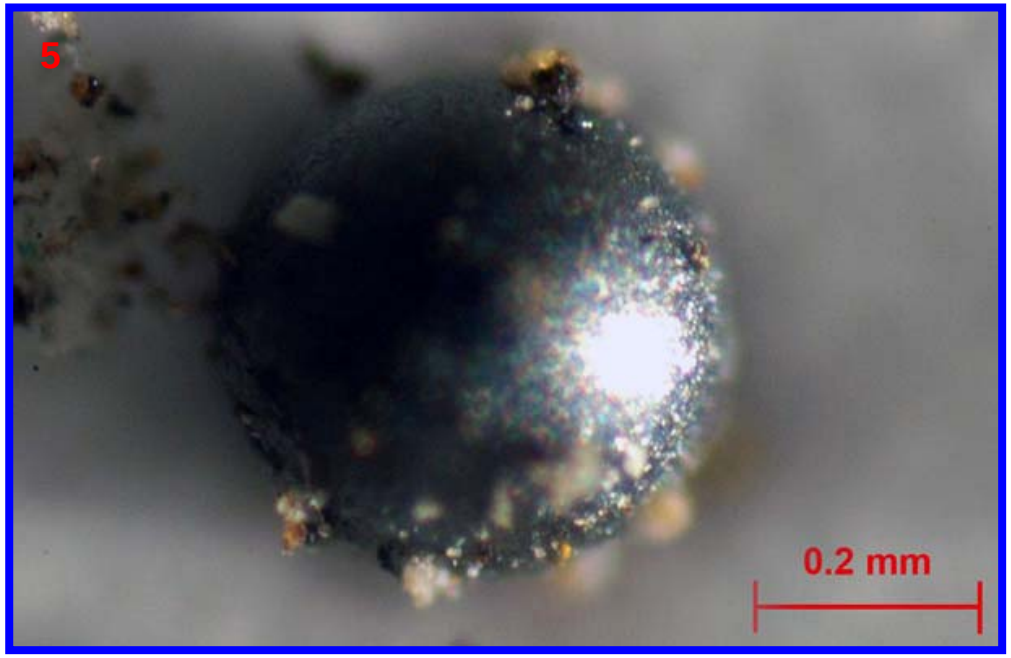


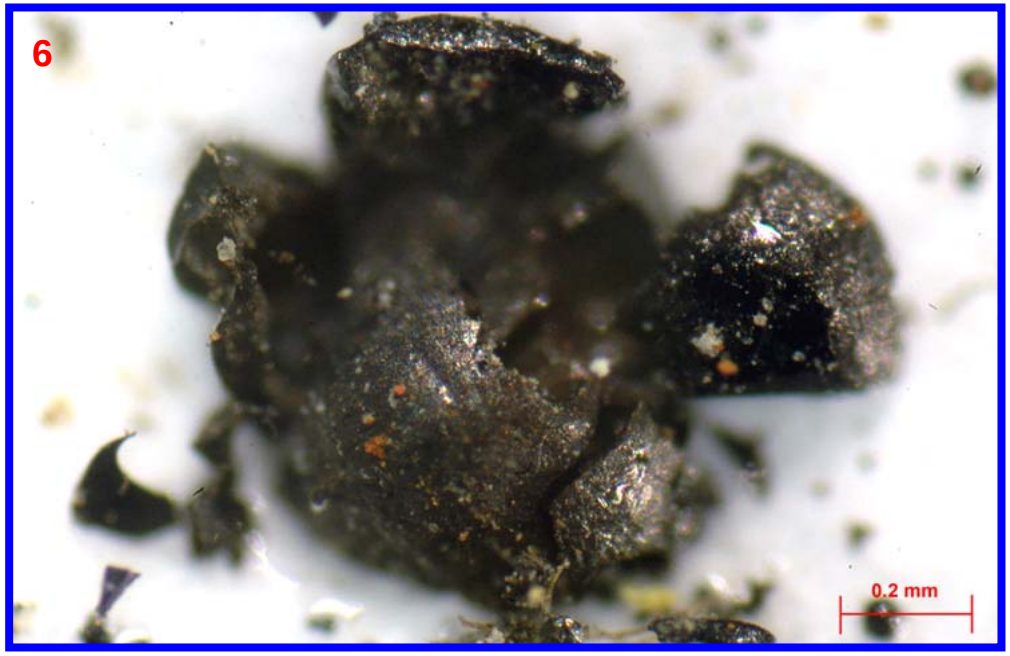
4 : Particules de mercure sphériques et noires identifiables jusqu'au centième de mm (microscope 50x). Certaines particules noires sont difformes et semblent également être du mercure

5 : Particule de mercure noire présentant un aspect de surface rugueux avec des dépôts de particules (microscope 200x).

6 : Particule de mercure similaire à l'image 5 mais écrasée. Cette image confirme la nature solide des particules noires.

©TARCHINI





Dans l'ensemble, les concentrations des particules de mercure (deux types confondus) varient selon la zone concernée et sont généralement plus élevées sur les prélèvements effectués proche des zones identifiables à l'œil nu comme fortement contaminées – schéma annexe 11. Une des observations réalisées permet de révéler la structure solide des billes sphériques de nature noire (images 5 et 6)

D'après les observations effectuées (œil nu, binoculaire et microscope), la présence de résidus de mercure sur les tableaux électriques 6 et 7 semble être le résultat d'un processus particulier (pulvérisation, implosion, redéposition) et non d'un simple déversement. En effet, il semble difficile qu'une telle cause ait pu répandre du mercure sur une aussi grande surface et sous forme de particules d'aussi petites dimensions (pulvérisation) et présentes en aussi grandes quantités. La supposition d'une déposition de particules de mercure à travers un processus d'évaporation/condensation et/ou une déposition à travers les poussières est probable. Cependant, ces processus ne peuvent avoir lieu que dans des conditions très particulières que l'on ne retrouve en tout cas pas dans la réserve du musée de la science et de l'industrie. Ce cas de figure serait plus probable dans l'ancien local de stockage de l'appareillage (musée des trams) où les conditions atmosphériques sont très fluctuantes. Les différents états de surface observés pourraient être justifiés par l'existence d'un cycle d'altération lié à ces sphères : bille de mercure pure – dépôt de particules + oxydation (sulfuration ou chloruration produisant une couleur noire – voir section 2.2.3.1) – formation d'une croûte superficielle – attaque en profondeur et modification croissante de la structure interne de la sphère jusqu'à l'obtention d'une bille noire et dure partiellement évidée. La projection de mercure sous forme de pulvérisation durant l'utilisation d'un aspirateur (sortie d'air) employé pour nettoyer un déversement de mercure pourrait également être envisagée comme cause de présence de mercure sur les tableaux, mais ceci ne justifie pas une étendue aussi importante de la contamination. La cause la plus probable reste l'implosion d'une ampoule durant le fonctionnement de l'appareillage. En effet, il semblerait que l'implosion d'une ampoule sous vide contenant du mercure provoque une projection importante de mercure (à haute température) sous forme de billes microscopiques[482]. Ainsi, l'identification des particules de mercure présentes uniquement sur la face arrière des panneaux électriques serait justifiée par le fait que les ampoules se trouvaient derrière ces derniers au moment de l'accident.

Un certain nombre de points abordés précédemment et considérées comme importants pour l'évaluation du risque lié à la présence mercure, ont été examinés plus en profondeur au travers d'analyses d'échantillons d'air et de matières prélevés sur place :

- Prélèvements d'air : le seul moyen de confirmer une concentration de vapeurs de mercure acceptable, par rapport aux normes en vigueur, est la réalisation de mesures dans la réserve du musée de la science et de l'industrie. En l'absence de matériel adéquat pour des mesures

[482] SOURCE ORALE

in-situ, ces dernières ont été effectuées en laboratoire, à partir de prélèvements d'échantillons d'air.

- Prélèvements de poussières et de matériaux poreux : ceux-ci ont été réalisés sur l'ensemble des surfaces des redresseurs à vapeurs de mercure.

- Prélèvement de certains produits d'altérations : la présence de fragments de verre est l'opportunité d'approfondir l'investigation sur la composition de la pellicule noire décelée sur la face intérieure de l'ampoule ainsi que la composition du verre. L'étude de certains produits d'altération ainsi que l'examen d'éventuelles altérations issues d'interactions entre le mercure et d'autres matériaux sont également considérés.

Ces analyses ont été effectuées auprès de deux instances universitaires : la Faculté des Sciences (département de chimie) de Porto pour les analyses de poussières, d'échantillonnage d'air et des matériaux composant la boîte en bois et le département de conservation-restauration de l'université nouvelle de Lisbonne pour l'analyse des produits d'altération. Le contact effectué, à travers Paula Menino Homem - professeur en conservation-restauration à la faculté des lettres de Porto, contactée par M. Christian Degrigny pour m'épauler dans mes recherches - avec deux professeurs de la Faculté des Sciences (M. Carlos Manuel de Meio Pereira et Mme Ana Maria Teixeira Martins) a permis la mise en place d'une collaboration permettant d'effectuer les analyses requises. Ces dernières ont été réalisées sur cinq séances (auxquelles j'ai pu assister et collaborer), dans le cadre d'un cours pratique sur la spectroscopie d'absorption atomique (SAA) donné par le professeur Carlos Pereira à un groupe de quatre élèves de 4ème année de chimie. Le contact avec l'université nouvelle de Lisbonne est le résultat d'une recherche personnelle effectuée auprès des instances possédant le matériel recherché pour la réalisation des analyses des produits d'altération (fluorescence-X, diffraction de rayon-X et microscopie électronique à balayage). L'institut portugais de conservation-restauration, une des institutions contactées (liste complète en annexe 12), m'a conseillé de prendre contact avec le département de conservation-restauration de l'université nouvelle de Lisbonne qui a répondu positivement à ma demande. Les personnes impliquées dans cette collaboration ont été : M. António Pires de Matos (Docteur), Mme Agusta Lima (professeur assistante) ainsi que Mme Márcia Vilarigues.

L'emplacement des échantillons de poussière, d'air ainsi que de bois et textile, prélevés pour les analyses réalisées en collaboration avec la Faculté des Sciences est indiqué sur le plan de la réserve du musée de la science et de l'industrie (annexe 10). Le schéma de l'annexe 11 précise la localisation des prélèvements de poussière effectués sur la face arrière des panneaux électriques 6 et 7. Les échantillons sont identifiés en fonction de la numérotation des divers éléments de l'appareillage, par la lettre A pour air et P pour poussière, B pour bois et T pour textile. En ce qui concerne les panneaux, les lettres Av représentent la face avant, alors que les lettres Ar représentent la face arrière. Les prélèvements effectués sur la face arrière ont été réalisés sur les parties où aucune trace de mercure n'a été identifiée à l'œil nu, afin de déterminer si ces zones présentent également des traces du

mercure. Ces prélèvements ont été réalisés sur des surfaces de l'ordre de plusieurs décimètres carrés. L'échantillon P4 a été prélevé sur la partie supérieure de l'ampoule stockée à l'envers dans sa boîte d'origine, zone ne semblant pas comporter de résidus de mercure projetés lors de la rupture de l'ampoule, mais simplement une couche de poussière uniformément déposée. Les prélèvements de poussière ont été réalisés à l'aide d'un pinceau et d'une feuille de papier (fig.68) ou de deux feuilles de papier par les 4 élèves de la Faculté des Sciences. Un des échantillons (P14), non représenté sur le plan de la réserve, a été prélevé à l'entrée de cette dernière, à une hauteur d'environ 2 mètres du sol. Trois échantillons d'air ont été prélevés au total. Le premier (A1) a été réalisé selon l'adaptation d'une méthode développée par l'EPA : method 29, determination of metals émmision from stationary sources. Le montage utilisé est représenté sur la figure 69 et consiste en l'utilisation de deux flacons contenant des solutions liquides et d'une pompe d'échantillonnage d'air de type SKC. Des informations sur la méthode de base employée ainsi que le déroulement précis du prélèvement de cet échantillon d'air sont présentes en annexe 14.

Fig.68 – Prélèvement de poussière à l'aide d'un pinceau et d'une feuille de papier [484]

Fig.69 – Appareillage pour le prélèvement d'air[483]

Les deux autres échantillons d'air ont été prélevés grâce à l'utilisation de deux capsules absorbantes (voir chap.2.6.2). Le premier (A2) a été placé, pendant une durée de 7 heures sur mon habit de travail à la hauteur des voies respiratoires, pendant l'aspiration des poussières présentes sur les redresseurs. Le deuxième (A3) a été positionné à l'intérieur de l'ampoule cassée (mi-hauteur), de laquelle a été retiré le mercure, pendant une durée de 16 heures.

Les résultats des analyses sont donnés dans les tableaux ci-dessous en μg/g de poussière pour les échantillons de poussière et en mg/m^3 pour les échantillons d'air. Pour des raisons de diligence et de manque de disponibilité, les échantillons de textile et de bois n'on pas pu être analysés. L'interprétation des résultats est réalisée en se basant sur le tableau développé par M. Jean-Guy Guillot, chimiste à l'institut toxicologique du Québec (INSPQ)[485]. Ce tableau illustre la relation entre la quantité de mercure identifiée dans les poussières et le degré de contamination.

[483] ©TARCHINI

[484] ©TARCHINI

[485] Guillot, 1996[3]

Poussière

Echantillon	Masse échantillon (g)	Absorption	Concentration de mercure (µg /g de poussière)	Degré de contamination
P2	0.0459	0.215	3.92	modéré
P4 (dil. 4 x)	0.0236	0.395	61.7	élevé
P5av	0.0257	0.208	6.72	modéré
P6ar	0.0199	-0.446	1.05	faible
P7ar (dil. 10x)	0,0334	0.326	87.9	élevé
P8	0.0254	0.058	0.00	aucun
P9	0.0200	0.076	1.87	faible
P10	0.0431	0.065	0.00	aucun
P12	0.0224	0.024	0.00	aucun
P13	0.0218	-0.011	0.00	aucun
P14	0.0288	-0,889	4.78	modéré

Tab.3 - Tableau illustrant le degré de contamination de chaque échantillon de poussière en fonction de sa teneur en mercure[486]

Les résultats des analyses effectuées permettent d'identifier des traces de mercure dans la plupart des poussières prélevées. Les échantillons P2, P5av et P14 correspondent à une contamination modérée, alors que l'échantillon P6ar correspond à une faible contamination. Une forte contamination est détectée en ce qui concerne les poussières présentes dans la boîte de transport d'origine (échantillon P4) à l'intérieur de laquelle se trouve l'ampoule cassée. Ce résultat est cohérent du fait que ces poussières ont été exposées au mercure présent dans l'ampoule cassée pendant plusieurs années. Ceci est une bonne illustration du cycle d'évaporation et de redéposition du mercure à travers les poussières. L'échantillon P7ar présente un résultat anormalement élevé pour une zone où le mercure n'est pas identifié à l'œil nu et est sûrement dû au prélèvement d'une bille de mercure de grande dimension. Cette bille aurait pu être négligée durant l'observation à l'œil nu ou transmise à travers le pinceau employé pour les prélèvements (il semblerait que le même pinceau ait été utilisé pour plusieurs prélèvements). Les échantillons P8, P10, P12 et P13 ne présentent aucune trace de mercure. Ces derniers devaient vraisemblablement être stockés dans une zone protégée par rapport au reste de l'appareillage. Le résultat de l'échantillon P14 semble relativement élevé pour une zone de prélèvement située en dehors de la réserve. On conclue de ces résultats que les poussières présentes sur l'appareillage présentent un niveau de contamination moyen, avec des pics de contamination élevés dans la caisse en bois comportant l'ampoule cassée ainsi que sur certaines zones (où le mercure est identifié à l'œil nu) des panneaux électriques 6 et 7.

Notons que le protocole courant de prélèvement des poussières (développé par Guillot) permettant d'évaluer la contamination de locaux par le mercure métallique n'a été consulté qu'après l'intervention

[486] ©TARCHINI

dans la réserve du musée de la science et de l'industrie. Cette dernière reste néanmoins valable. En effet, le protocole de Guillot conseille de faire le prélèvement sur une surface de 1000 cm2 et de récolter une quantité équivalente ou supérieure à 25 mg de poussière. Les prélèvements de la réserve du musée de la science et de l'industrie ont été effectués sur une surface inférieure à celle recommandée, mais les quantités importantes de poussières déposées ont permis de prélever des quantités bien supérieures à 25 mg. Finalement, les masses de poussière pesées avant analyses sont comprises entre 20 et 45 mg (Tab.1) et correspondent donc, à peu de chose près, aux quantités recommandées.

Air

Echantllon	**Abs**	**Conc.** (μg/L)	**Masse Hg** (mg)	**Temps** (min)	**Volume** (m^3)	**Concentration Hg** (mg/m^3)
AB	0.019	-0.210	-0.000010050	-	-	0.00
A1	10.213	104.237	0.0052118	420	0.0084	0.62
A2 (dil. 2 x)	12.212	124.72	0.012472	960	0.019	0.65
A3						3.3

Tab.4 - Tableau illustrant les résultats des analyses des échantillonnages d'air [487]

Les concentrations de mercure dans l'air (mg/m^3) sont calculées à partir de la masse de mercure (mg) selon les indications données par le fabriquant dans le mode d'emplois des badges SKC®, présenté en annexe 13.

Le résultat de l'échantillon A2 (620 $\mu g/m^3$) démontre que l'élimination de poussières moyennement contaminées à l'aide d'un pinceau et d'un aspirateur génère des niveaux de concentration de vapeur de mercure dans l'air nettement supérieurs aux valeurs recommandées par les organismes compétents et nécessite l'utilisation d'une protection respiratoire adéquate. En effet, la valeur mesurée est environ 6 fois supérieure à la valeur maximale recommandée par les Etats-Unis pour les lieux de travail (OSHA : PEL = 0.1 mg/m^3) et environ 600 fois supérieur à la valeur recommandée par la WHO (1 $\mu g/m^3$). La valeur mesurée dans l'ampoule cassée (A3) donne un résultat semblable et démontre que l'extraction du mercure ne permet pas une décontamination totale de l'ampoule. L'analyse de la qualité de l'air de la réserve du musée de la science et de l'industrie (échantillon A1) donne un résultat 33 fois supérieur (3.3 mg/m^3) à la PEL. Ce résultat peut difficilement être considéré comme valable, car les conditions atmosphériques (basses températures et forte ventilation) ne justifient pas une teneur tant élevée en vapeur de mercure dans l'air. Ce résultat peut être dû au dysfonctionnement de la pompe SKC® qui a fonctionné par à-coups pendant toute la durée du prélèvement et qui s'est arrêtée à plusieurs reprises ou à une erreur survenue pendant l'analyse. Le même prélèvement, élaboré dans des conditions normales de fonctionnement (flux d'air contant de 12 mL/s), effectué environ un mois plus tard donne un résultat de 2.1 $\mu g/m^3$. Ce résultat est beaucoup plus cohérent que

[487] ©TARCHINI

le précédent : 1500 fois inférieur et bien en dessous de la PEL. Ce résultat est cependant supérieur aux recommandations de la WHO, qui correspondent à une valeur de 1 $\mu g/m^3$. Même s'ils sont pertinents, les résultats d'analyse SAA ne doivent être considérés que comme valeurs indicatives. En effet, ces analyses ont été effectuées dans le cadre d'un travail d'optimisation de l'emploi de la méthode de détection du mercure par génération d'hydrures. Le personnel impliqué dans cette opération ne possédait donc pas l'expérience adéquate requise.

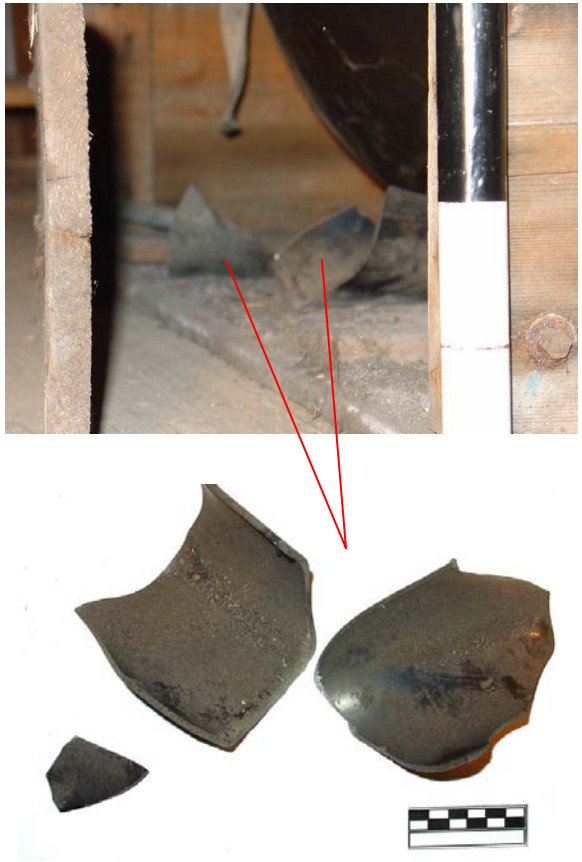
Les analyses de fluorescence-X effectuées auprès de l'université nouvelle de Lisbonne (département de conservation-restauration) ont été réalisées sur la base d'un fragment de verre de l'ampoule et d'une pellicule noire déposée sur la face intérieure de cette dernière ainsi que divers échantillons prélevés sur cette dernière. Les informations techniques sur le principe de la fluorescence X ainsi que sur l'appareillage spécifiquement employé pour ces analyses sont présentes en annexe 14. Lorsque le fragment de verre est observé sur sa tranche, celui-ci est constitué d'une couche épaisse (~ 5 mm) de verre recouvert d'une fine pellicule noire (quelques centièmes de mm) sur sa face intérieure. Le spectre (p. 125) obtenu sur la tranche (A) donne la composition du verre: Si, Ca, Ti, Fe et probablement Pb (10.5 KeV). Les éléments majoritaires sont le silicium (Si) et le fer (Fe), le titane (Ti) et le calcium étant minoritaires. Le spectre de la pellicule noire (B) montre en plus des constituants du verre la présence supplémentaire de mercure (Hg). La détection des constituants du verre sur cette zone est sûrement due au fait que le faisceau incident n'ait pas été focalisé sur la seule pellicule noire mais ait débordé aussi sur le verre. La présence relativement importante de zinc sur ce spectre est vraisemblablement due à des résidus d'altération provenant d'éléments en métal zingué présent dans la boîte en bois dans laquelle les fragments de verre sont restés pendant plusieurs années. Les autres éléments présents (potassium (K) et Chlore (Cl) semblent être issus d'une pollution extérieure (atmosphérique ?). Le spectre N°3 (p.125) est la confirmation que la pellicule noire présente sur la face intérieure du verre est principalement constituée de mercure. Lorsque l'on soustrait le spectre n°1 et 3 au spectre n°2, il apparaît clairement que les éléments restant (K, Cl et Zn) semblent provenir d'une source de pollution extérieure.

Ces analyses confirment la présence de mercure dans la pellicule noire recouvrant la surface intérieure de l'ampoule, au niveau des bras anodiques en verre. Cependant, l'hypothèse de la présence de carbone, provenant de la consommation de l'anode en graphite, comme élément constituant cette pellicule n'a pas pu être confirmée par ces analyses. En effet, cet élément n'est pas détectable par fluorescence-X. Ces résultats ne confirment pas non plus la présence d'une interaction chimique entre ce résidu noir et le verre constituant l'ampoule, car la précision de la technique ne permet pas une focalisation assez minutieuse sur l'interface couche noir – verre. Une analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) muni d'un spectromètre à dispersion d'énergie (SDE) serait nécessaire pour approfondir cette investigation.

1

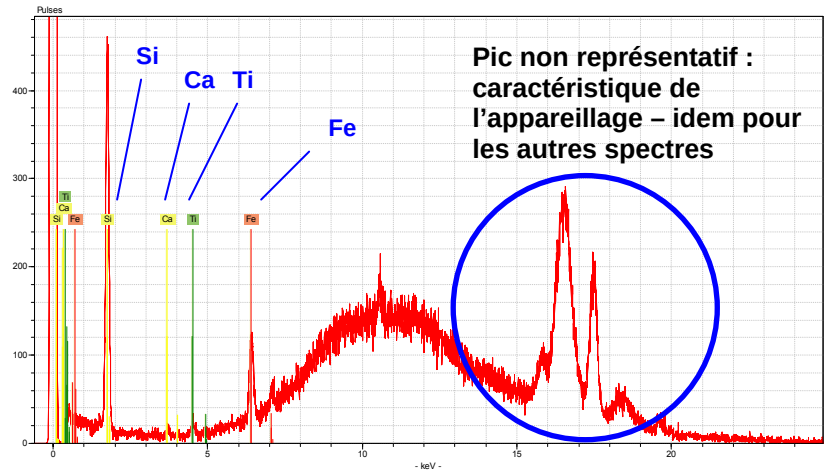
Fragment d'ampoule récolté au fond de la caisse en bois, parmi les débris résultant de la fracture. La face intérieure du fragment comporte une fine couche (quelques centièmes de millimètre) noire, lisse et homogène fortement fixée au verre. Dimensions approximatives du fragment : 2 x 01 x 0.4 cm.

Les analyses sont effectuées sur la tranche du fragment. Le spectre **A** (réalisé sur la partie verre) révèle la constitution du verre. Le spectre **B** (réalisé sur la couche noire) révèle la présence de mercure dans la couche noire.

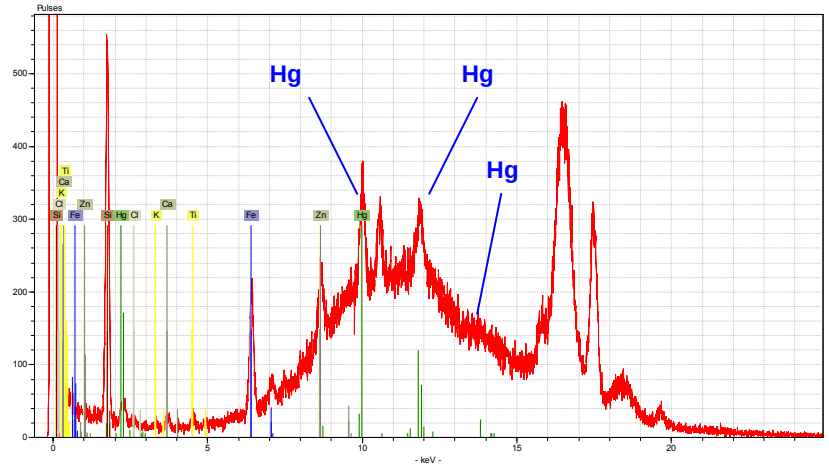


©TARCHINI

A



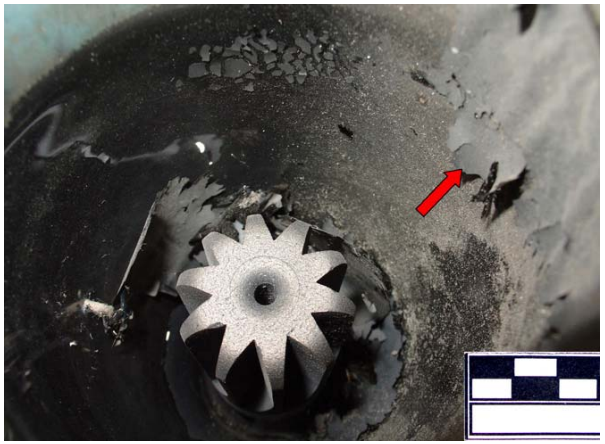
B



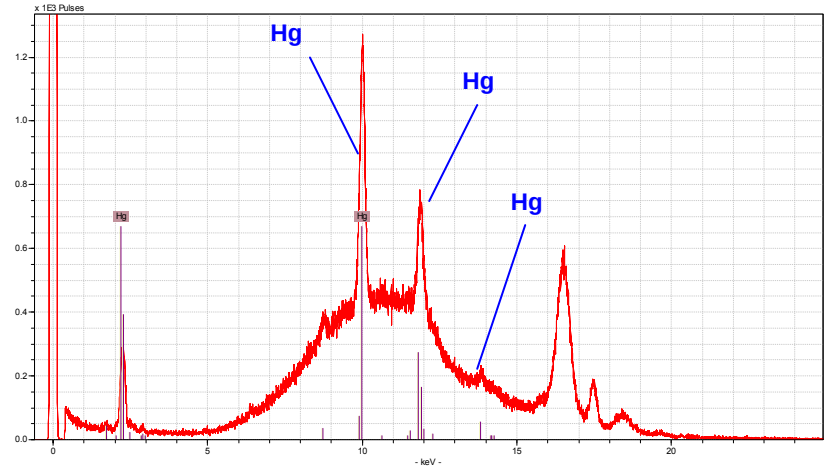
2

Pellicule noire friable de quelques centièmes de mm faiblement fixée à la paroi intérieure du verre, prélevée aux alentours de l'anode du bras cassé.

Le spectre résultant de l'analyse confirme la présence de mercure dans cette pellicule.



©TARCHINI



Les spectres résultant des analyses concernant les produits d'altération, de nature blanche (échantillons A, B et C représentés sur la fig.70) prélevés sur la base de l'ampoule sont représentés en annexe 15. Pour le spectre 3, l'élément majoritaire détecté est le zinc (Zn) ; le fer (Fe) et le cuivre (Cu) étant plutôt des éléments minoritaires. Ce résidu blanc et poudreux semble être un produit d'altération du zinc (sulfate de zinc, chlorure de zinc, etc.) issu d'un processus de dégradation des chapeaux cathodiques, peut-être constitués de fer zingué. Le processus de corrosion galvanique aurait commencé entre les câbles constitués de cuivre et la couche de zinc (élément sacrificiel) et une fois cette dernière altérée, le processus aurait pu se poursuivre avec son support en fer (mis à nu).

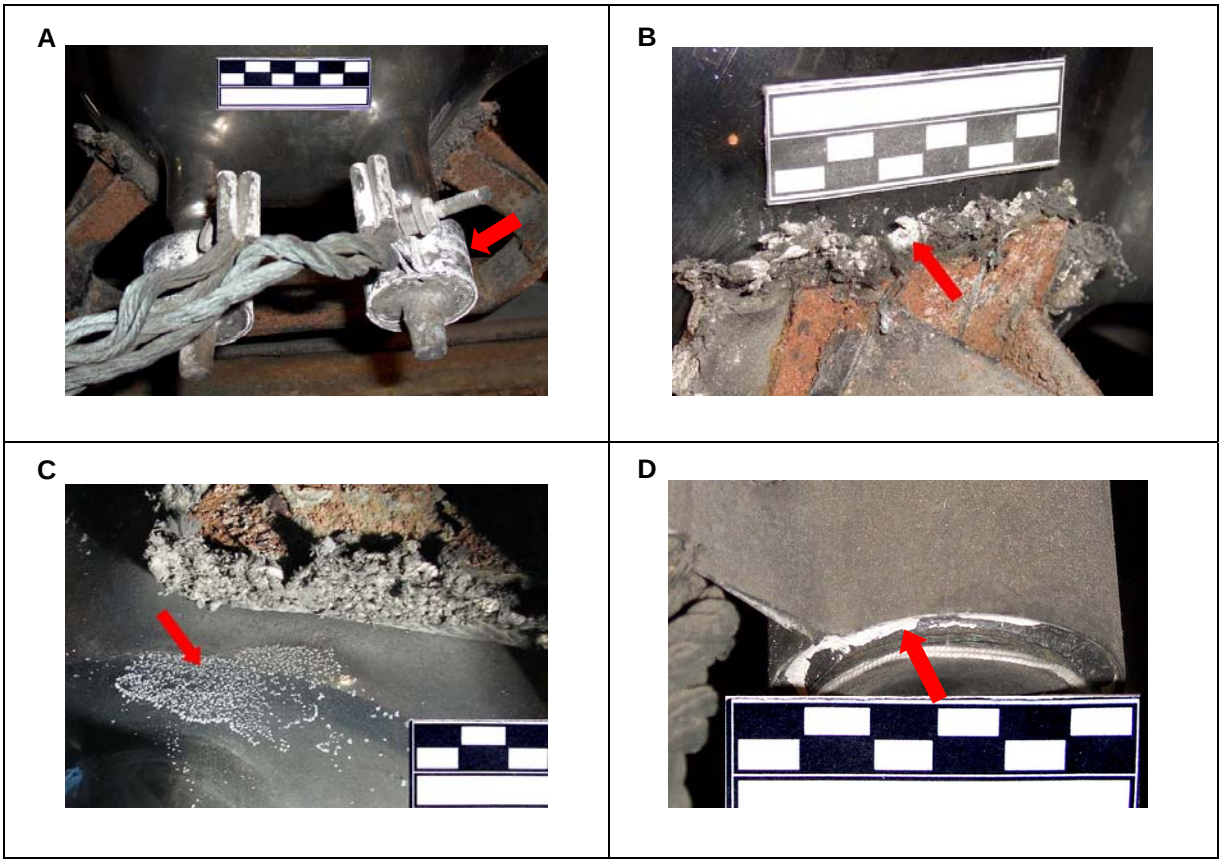


Fig. 70 – A - échantillons 3 : connexions métalliques (cathode de l'ampoule); B - échantillon 4 : isolation d'un élément de soutien (base de l'ampoule) ; C - échantillon 5 : tache blanche (base de l'ampoule) ; D - échantillons 7 : poudre blanche ; connexion anodique [488]

Les traces de fer détectées par l'analyse proviendraient donc de ce support (particules arrachées avec le scalpel). La présence de cuivre altéré (câble) à proximité de cet élément peut justifier la présence d'un pic de cuivre sur le spectre. Pour le spectre 4, le produit d'altération de nature blanche et poudreuse présent sur l'isolation en amiante, contient une grande quantité de zinc (Zn) et de baryum (Ba) et dans une moindre mesure, du calcium (Ca), du fer (Fe) ainsi que du strontium (Sr). Le seul élément que l'on retrouve dans la composition de l'amiante (amosite, crocidolite) est le fer. Les autres éléments semblent faire partie de la constitution du textile isolant (Zn, Ba) ou d'une pollution externe (Ca, Sr). La présence importante de zinc et de baryum peut être due à leur utilisation comme

[488] ©TARCHINI

constituant du textile élaboré à base d'amiante. Le spectre 5 présente une grande similitude avec le spectre précédent. Les principaux éléments (Zn, Ba, Fe, et Ca) sont communs aux deux spectres et dans un ordre de grandeur bien inférieur, on trouve également le nickel et le soufre. Le strontium est le seul élément clairement identifié dans le spectre 4 que l'on ne retrouve pas dans le spectre 5. Le cuivre et le potassium sont par contre uniquement décelables dans ce dernier spectre. La grande similitude de composition de ces deux produits ainsi que la proximité des zones concernées amène à penser que le dépôt blanc (échantillon 5) est issu d'une migration, non expliquée, des produits d'altération de l'isolation en amiante (échantillon 4) sur la surface du verre.

Pour le spectre 6 (annexe 15), la peinture grise recouvrant la deuxième partie des bras anodiques en verre de l'ampoule est essentiellement constituée de fer (Fe), mais contient également du cuivre (Cu), du Zinc (Zn), du Calcium (Ca), du potassium (K) et du soufre. Le spectre 7 indique que le principal constituant de la poudre blanche et compacte à la base du chapeau métallique d'une des connections anodiques est le calcium (Ca) et le soufre. Le spectre révèle également la présence de zinc (Zn), cuivre (Cu), fer (Fe) et strontium (Sr). Les deux composants analysés se trouvant très proche, il est possible que le fer identifié sur la poudre blanche (spectre 7) provienne de la peinture ferreuse, alors que le calcium identifié dans la peinture semble provenir de la poudre blanche. La présence de calcium comme constituant principal de cette poudre (spectre 7) semble confirmer que ce produit n'est pas le résultat d'une dégradation mais une sorte de masse consistante (sulfate de calcium ?) employée pour le scellage des chapeaux anodiques.

La particule grise, essentiellement constituée de plomb et de fer (spectre 8) semble n'être qu'une projection métallique qui s'est fixée, à un moment ou à un autre, à la surface du verre. Quant à la poudre jaune (spectre 9), également identifiée sur la surface du verre, celle-ci est principalement constituée de fer et d'un peu de soufre et ne semble pas être le résultat une altération liée au verre.

4.2.3.4 Gestion du risque

Certains éléments appartenant à l'ensemble des redresseurs à vapeur de mercure et identifiés dans le chapitre précédent, représentent une menace directe de contamination des locaux du musée. D'autre part, un accident lié aux éléments comportant du mercure pourrait occasionner une contamination des lieux (atmosphère, sol, objets). La conservation de cet appareillage nécessite donc la mise en place des conditions les plus favorables, et ceci sur le long terme. Cette intervention peut être divisée en quatre étapes :

- Décontamination des objets à risque ;
- Interventions pratiques de conservation – restauration dans l'optique de limiter le risque lié à la présence de mercure ;
- Aménagement des lieux ;
- Recommandations (conservation préventive, manipulation, restauration, accident).

Le travail effectué sur cet ensemble d'appareil impliquant la manipulation d'une substance toxique (mercure), il nécessite l'utilisation de moyens de protection personnelle. Les interventions de décontamination et de dépoussiérage sont réalisées en portant un masque 3M® muni de filtre à mercure 6069 HgP3 (vapeurs + particules), des lunettes de protection, des gants nitrile ainsi qu'un bleu de travail. Toute autre opération réalisée sur cet appareillage nécessite l'utilisation minimum d'un bleu de travail, de lunettes de protection et de gants. Tout résidu de mercure doit être stocké dans des récipients adéquats – bouteille en verre, plastique ou acier hermétiquement fermées – convenablement étiquetées et tout déchet contaminé (poussières, objets en contact du mercure) doit être stocké dans des sacs plastiques hermétiques et étiquetés (déchets contaminés par le mercure) qui ne peuvent être éliminés qu'en tant que déchets spéciaux.

L'extraction du mercure de l'ampoule cassée est une intervention nécessaire, car cet élément représente une menace directe pour la réserve ainsi que le personnel du musée. Cette opération doit être réfléchie, car l'ampoule en verre est un élément fragile, qui a vieilli et a déjà subi un ou plusieurs chocs (rupture). Une mauvaise manipulation peut donc entraîner des conséquences désastreuses comme le déversement du mercure sur le sol de la réserve. Un protocole d'intervention (annexe 16) est donc développé avant de procéder à l'extraction du mercure de l'ampoule. L'intervention ayant été définie dans l'optique de limiter au maximum les manipulations de l'ampoule, le pompage du mercure a été retenu comme technique d'extraction. Le seul accès à l'intérieur de l'ampoule est le bras cassé situé sur la partie supérieure (fig.71).

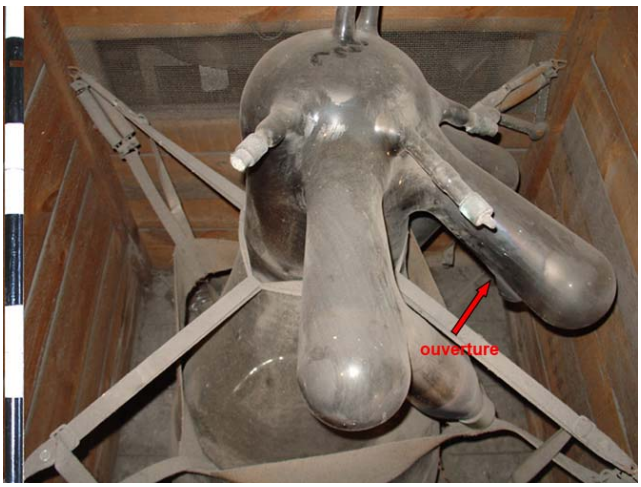


Fig.71 – Vue de dessus de l'ampoule dans sa boîte de stockage [489]

Fig.72 – Vue de profil de l'ampoule une fois l'un des côtés de sa boîte de stockage éliminé [490]

A ce stade, un dépoussiérage de l'ampoule est nécessaire pour poursuivre les opérations. Par manque de moyens financiers, de temps et de possibilités d'obtention du matériel, un aspirateur spécialement conçu pour l'élimination de poussières contaminées ou un filtre (charbon actif) adaptable à l'aspirateur du musée de l'industrie n'ont pu être obtenu. Après soumission du problème à

[489] ©TARCHINI

[490] ©TARCHINI

un chimiste spécialisé dans le domaine de la décontamination du mercure (M. Jean-Guy Guillot de l'INSPQ), un procédé relativement simple a été retenu pour cette intervention. La sortie d'air de l'aspirateur employé pour l'élimination des poussières est reliée à un tuyau dont l'extrémité est placée à l'extérieur du bâtiment. Ceci permet d'évacuer l'air potentiellement contaminé de la sortie de l'aspirateur à l'extérieur du musée. Dans ce cas, les quantités de vapeurs de mercure produites par l'aspiration des poussières ne représentent pas un danger pour l'environnement. La surface de l'ampoule est ensuite nettoyée à l'aide de chiffon imbibé d'eau distillée puis d'éthanol. Une fois l'ampoule dépoussiérée, la zone située devant l'ouverture de la boîte est protégée à l'aide d'un plastique posé au sol et délimitée en plaçant un tuyau d'aspirateur en dessous (fig.73a). Ceci permet de surélever les bords de la zone de travail et ainsi d'éviter que le mercure ne s'échappe en cas de déversement. L'ampoule est ensuite positionnée (couchée) de façon à ce que le bras cassé reste tourné vers le haut (fig.73a). Une fois couchée, le mercure est toujours du côté de la chambre de condensation qui repose sur une couverture (fig.73b). En soulevant délicatement la chambre de condensation de l'ampoule (une personne est suffisante), le mercure est déplacé vers la base. Cette opération doit être effectuée avec soin, afin que le mercure s'écoule en un mince filet, pour ne pas provoquer de choc trop violent (densité du mercure). L'ampoule est alors calée à l'aide de deux mousses (fig.73a), de façon à ce qu'elle ne repose pas sur les bras en verre.

a

b

Fig.73 – Ampoule sortie de sa boîte et callée à l'aide de mousses (**a**). Détail sur la chambre de condensation contenant le mercure (**b**) [491]

Dans cette position, la hauteur entre l'ouverture (bras cassé) et le bain de mercure est encore trop importante pour l'utilisation d'une pompe manuelle de laboratoire, munie d'une pipette et d'un tube plastique semi-souple permettant d'accéder au mercure. En effet, une fois le mercure pompé dans la pipette, le simple fait de retirer l'extrémité du tube du bain provoque la vidange de la seringue. Un meilleur pompage devant être obtenu avec la seringue en position horizontale, l'ampoule a été

[491] ©TARCHINI

basculée (60°) vers la gauche par rapport à son axe. Une fois le mercure pompé dans la seringue (fig.74), cette dernière est directement penchée vers l'arrière, afin d'empêcher le mercure de retomber (par gravité) (fig.75), et vidée, comme le montre la figure 76, dans une bouteille en verre de type Pyrex posée dans un bac de rétention.

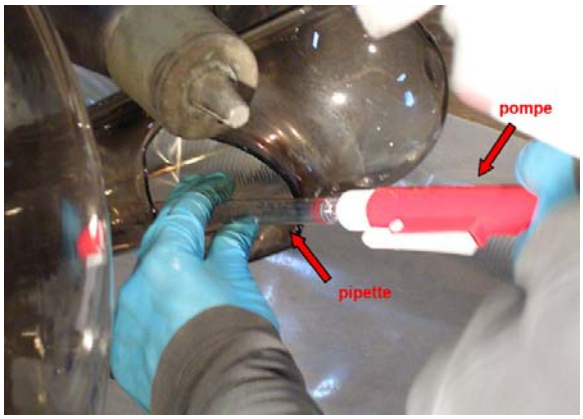


Fig.74 – Pompage du mercure en position horizontale [492]

Fig.75 – Pipette (avec pompe) pleine de mercure extraite de l'ampoule et basculée vers l'arrière [493]

Fig.76 – Vidange de la pipette dans la bouteille en Pyrex® [494]

Fig.77 – Stockage du mercure dans bouteille Pyrex® [495]

Cette opération est répétée jusqu'à ce que la quantité de mercure présente ne permette plus le pompage. Les derniers résidus sont alors éliminés en manipulant l'ampoule (deux trois personnes) afin de faire sortir le reste de mercure par le bras cassé. Après l'identification de résidus de mercure - probablement issus de la rupture de l'ampoule - dans les poussières présentes au fond de la caisse en bois, ces dernières ne sont pas éliminées à l'aide de l'aspirateur (risque de contamination de l'appareil), mais grâce à deux spatules en aluminium. Les poussières récupérées sont stockées dans un bocal en verre. Cette intervention a donné lieu à une réaction assez étonnante entre l'aluminium et le mercure qui est décrite dans un document présent en annexe 17 et qui confirme la présence

[492] ©TARCHINI

[493] ©TARCHINI

[494] ©TARCHINI

[495] ©TARCHINI

importante de mercure dans les poussières. Une fois le gros des poussières éliminées, de petites billes de mercure sont encore identifiables dans le fond de la boîte (fig.78). Leur présence confirme que la décontamination est incomplète.

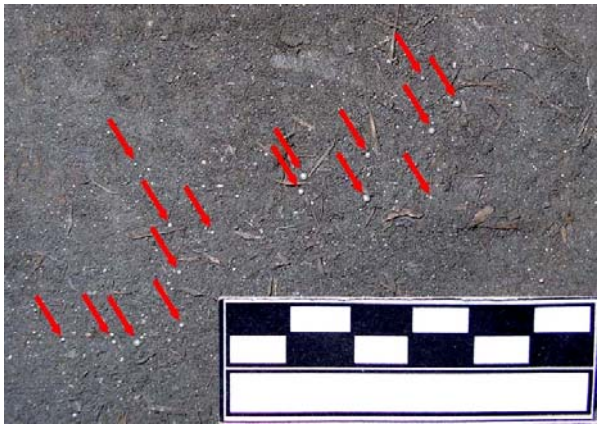


Fig.78 – résidus de mercure au fond de la boîte[496]

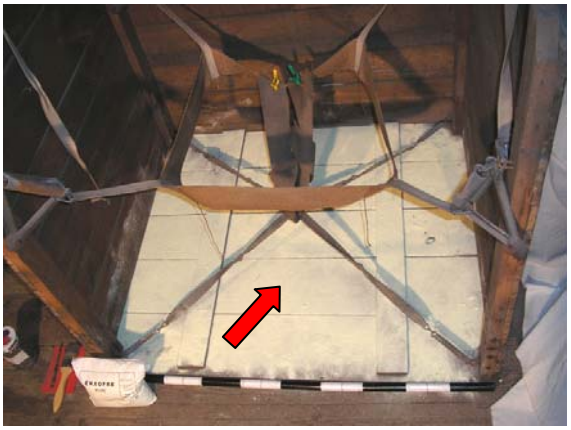


Fig.79 – soufre répandu dans le fond de la boîte[497]

L'utilisation d'un aspirateur n'étant toujours pas recommandée, la fleur de soufre est choisie comme méthode pour l'élimination des résidus de mercure (voir section 2.6.3). Une fois répandu dans le fond de la boîte (fig.79), la poudre jaune réagit pendant quelques jours – formant du sulfure de mercure avec les résidus – puis est finalement éliminée à l'aide de chiffons humidifiés, jetés aux ordures ménagères[498]. A ce stade, l'utilisation de l'aspirateur et d'un pinceau permet d'éliminer les derniers résidus de soufre, de soufre combiné au mercure et de poussière présents dans le fond et d'aspirer la boîte dans son ensemble (fig.80).

Fig.80 – Elimination des poussières de la boîte en bois avec pinceau et aspirateur [499]

Fig.81 – Application du produit Ballistol sur une tête de clou [500]

[496] ©TARCHINI

[497] ©TARCHINI

[498] GUILLOT, 1996[3]

[499] ©TARCHINI

[500] ©TARCHINI

Afin d'éviter la progression des phénomènes de corrosion des éléments d'assemblage (tendeurs, têtes de clous, têtes d'écrous) avec comme conséquence ultime l'effondrement de la boîte en bois ou l'instabilité de l'ampoule, ces derniers sont enduit du produit Ballistol®, sans traitement mécanique préalable (fig.81). Le côté de la boîte est ensuite remonté et les clous inutilisables remplacés.

Finalement, l'ampoule est replacée dans sa boîte (chambre de condensation vers le bas) selon les instructions données par un constructeur (fig.83)[501]. Elle n'est cependant pas en suspension dans la boîte (comme recommandé pour le transport), mais simplement posée sur un cercle amortisseur en polymère expansé placé au fond de la boîte (fig.82). Ceci permet de ne pas laisser les sangles (fixation de l'ampoule dans la boîte) sous tension et de réduire les efforts sur les matériaux.

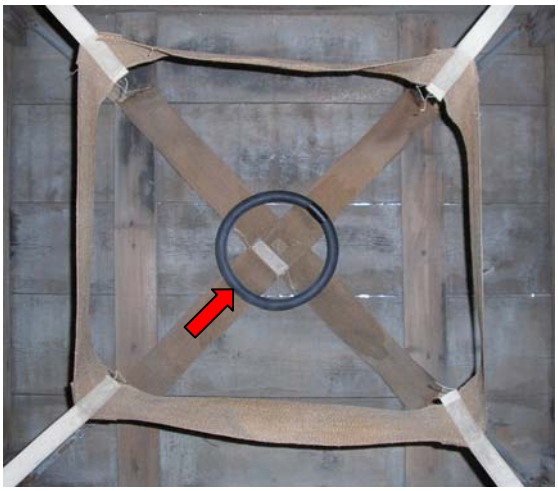


Fig.82 – Anneau en polymère expansé déposé dans le fond de la boîte [503]

Fig.83 – Ampoule remise en place dans sa boîte [502]

Les résidus (billes) de mercure recouvrant la surface des deux tableaux électriques représentent également un danger pour le musée et doivent absolument être éliminés. Pour les mêmes raisons que celles citées précédemment, l'utilisation d'un aspirateur est exclu pour cette opération. La méthode la plus économique, la plus rapide et certainement la plus efficace consiste en l'utilisation de bandes adhésives. Celles-ci sont appliquées directement sur la zone ou ont été identifiés des résidus de mercure (fig.84), puis retirées méticuleusement, pour ne pas faire retomber les billes collées (fig.84b), et placées dans un sac poubelle lui-même inséré dans un second ; les deux sacs étant convenablement fermés et celui du dessus étant étiqueté. Bien entendu, cette technique ne permet pas d'éliminer les éventuels résidus de mercure cachés par les nombreux composants (câbles électriques, fusibles, etc.), qui nécessiteraient un démontage complet, de ces éléments. La plus grande partie des billes de mercure sont cependant éliminées, dont celles qui représentent le plus grand danger pour le personnel du musée (contamination du sol, des habits, etc.).

[501] ACEC, 1954

[502] ©TARCHINI

[503] ©TARCHINI

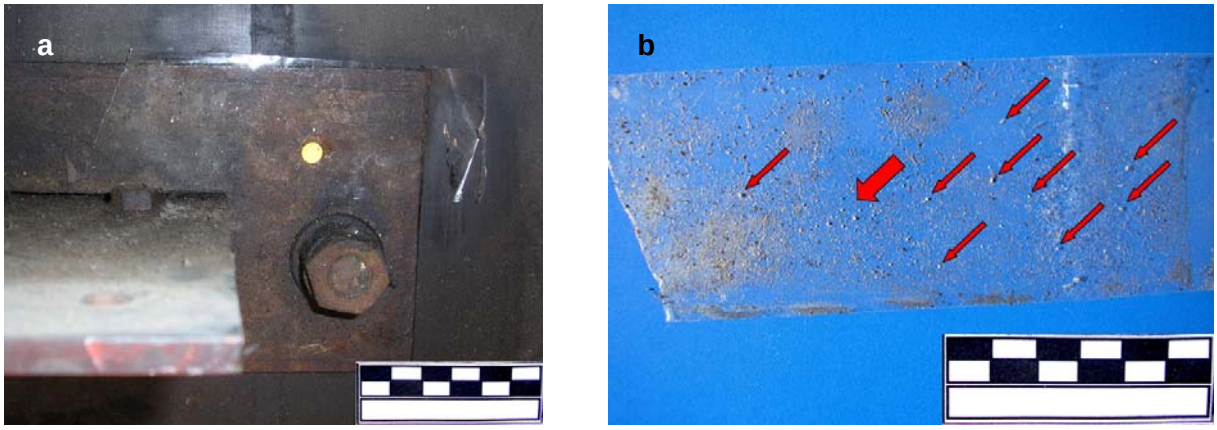


Fig.84 – Elimination des résidus de mercure présents sur les panneaux à l'aide de ruban adhésif : **a** - ruban collé sur la surface comportant les résidus et **b -** résidus de mercure fixés sur la face collante du ruban, une fois retiré [504]

Une fois tout résidu identifié retiré, l'ensemble des tableaux électriques est aspiré selon le même procédé que la boîte comportant l'ampoule cassée. Les poussières présentes sur les trois redresseurs à vapeur de mercure sont éliminées selon le même principe (pinceau + aspirateur) cité précédemment (fig.85).

Fig.85 – Elimination des poussières sur l'ensemble de l'appareillage à l'aide de pinceaux et d'un aspirateur [505]

[504] ©TARCHINI

[505] ©TARCHINI

Pour toutes ces interventions, on s'est assuré que le même sac d'aspirateur a été employé et qu'aucune personne autre que celles impliquées dans cette opération de nettoyage n'a utilisé cet appareil. Une fois la totalité des poussières éliminées, l'ensemble des surfaces métalliques sont nettoyées à l'aide de chiffons imbibés de white-spirit suivis d'un chiffon sec. Ce nettoyage a bien entendu été effectué une fois qu'on ait vérifié, par des tests de dissolution sur les peintures, l'innocuité du produit de nettoyage utilisé. Les ampoules en verre ont quant à elles été nettoyées à l'aide de chiffons imbibés d'éthanol. Lorsque les chiffons sont trop sales, ils sont automatiquement changés. Les chiffons employés sont également éliminés en tant que résidus contaminés. Dans l'ensemble, cette intervention, qui s'avère être relativement longue, doit être réalisée avec calme et sans précipitation. La distance entre les redresseurs étant restreinte et certaines zones difficilement accessibles, il est facile de heurter ou de s'accrocher à un bras en verre.

Les supports étant des éléments essentiels à la préservation des ampoules contenant le mercure, ils nécessitent une attention particulière. L'objectif n'étant pas de réaliser une intervention de restauration complète, mais de mettre en place les conditions préventives permettant de minimiser les risques liés à la présence de mercure, le temps dédié à cette problématique ne permet pas ici de réaliser un traitement en profondeur, ce qui impliquerait le démontage de certains éléments, l'élimination des produits de corrosion jusqu'à la surface d'origine et l'application d'une protection de surface. Le choix de la méthode sélectionnée pour le traitement des métaux composant les structures des supports des ampoules repose donc sur les critères suivants : facilité d'application et ralentissement du processus de corrosion. Avant le traitement, les isolations en amiante sont égalisées au ciseau (fig.87), afin d'éliminer les fibres susceptible de se détacher (accrochage). L'amiante a été préalablement humidifiée (fig.86) pour éviter la libération de particules microscopiques dangereuses en cas d'inhalation[506].

Fig.86 – Humidification des fibres d'amiante [507]

Fig.87 – Egalisation de l'isolation en amiante au ciseau [508]

[507] ©TARCHINI

[508] ©TARCHINI

Sur la base des deux critères mentionnés ci-dessus, il a été décidé de ne pas chercher à préserver les résidus de peinture friables dont le refixage demanderait beaucoup de temps et ne permettrait pas de traiter convenablement la corrosion. Les produits de corrosion les plus volumineux ainsi que les résidus de peinture friables ont donc été éliminés à l'aide d'une brosse à dent, ce qui permet de ne pas griffer les résidus de peinture conservés (fig.88). Le choix du produit de protection contre la corrosion repose également sur des critères semblables ; facilité d'application, ne nécessitant pas l'élimination totale des produits de corrosion, ralentissement du processus de corrosion, renouvellement aisé de la couche de protection, ne réagissant pas avec la peinture. L'huile Ballistol® (produit Allemand de chez KLEVER – fiche technique en annexe 20) s'avère comporter les caractéristiques exigées : elle fournit une protection active contre la corrosion (galvanique, milieu acide et milieu salin), se trouve être compatible avec la plupart des matériaux (métaux, bois, cuire) et généralement toute peinture résistante au pétrole, est non toxique et ne forme pas de film insoluble (réticulation) avec le temps. De plus, ce produit a déjà fait ses preuves dans le domaine de la conservation-restauration : employé dans le cadre de notre formation à la HEAA Arc (conseillé par M. Rolf Fritchi, conservateur-restaurateur) et recommandé par les professionnels pour la protection des objets scientifiques et techniques[509]. Les seuls inconvénients de ce produit sont qu'il ne constitue qu'une protection à court terme et qu'il a tendance à former un film qui reste gras.

Fig.88 – Elimination des produits de corrosion à la brosse [511]

Fig.89 – Application du produit Ballistol au pinceau [510]

Après avoir contacté un certain nombre d'armureries de la ville de Porto, l'une d'entre elles m'a donné les coordonnées de l'ONAL (Organisação National de Armamento de Lisboa), apparemment unique revendeur au Portugal de l'huile Ballistol®. Cet organisme m'a envoyé gratuitement 100mL d'huile Ballistol qui à été employé pour le traitement des structures métalliques des supports des ampoules ainsi que pour les connexions électriques des ampoules et pour les éléments métalliques de la boîte en bois. L'application du produit Ballistol® est réalisée localement au pinceau plat (5mm) en faisant attention de ne pas trop déborder sur la peinture et autres éléments et en évitant d'appliquer des

[509] ECHANGES MULTIPLES AVEC M. CHRISTIAN DEGRIGNY

[510] ©TARCHINI

[511] ©TARCHINI

quantités trop importantes (fig.89). Les excès de produits sont éliminés à l'aide d'un chiffon propre. Finalement, l'ensemble de la visserie est nettoyée par immersion dans un bain d'huile WD-40® avec l'action mécanique d'une brosse à dents suivi d'un rinçage dans un bain de White-spirit. Après une protection de la visserie à l'aide du produit ballistol, les plaques de protection des armoires de redresseurs sont remontées.

La figure 90 (photos après traitement) permettent de révéler l'aspect final des ampoules de verre.

Fig .90 – Ampoule à mercure après intervention [512]

Diverses interventions concernent l'aménagement des lieux et contribuent à la réduction, sur le long terme, des risques de dégradation des matériaux et d'accident lié à cet ensemble de redresseurs à vapeur de mercure. Dans ce but, les trois armoires sont protégées à l'aide de tissus épais en coton (fig.91), afin de bloquer les principaux accès de poussière (grilles supérieures et latérales ainsi que faces ouvertes des armoires). La caisse en bois est placée sur un film plastique permettant d'empêcher une attaque par les insectes à travers le plancher qui montre quelques signes d'infestation (petits monticules de sciure). Cette boîte ainsi que l'ensemble des panneaux électriques sont également recouverts de tissus. Le redresseur n°2 est stabilisé en plaçant des cales en bois à chacune des ses extrémités (fig.92). Par prévention, chaque redresseur est identifié à l'aide d'une pancarte d'avertissement, représentée en annexe 18, comportant les informations minimum pour éviter un accident (fig.91). Les bouteilles contenant le mercure ainsi que l'armoire dans laquelle elles se trouvent sont également identifiées, selon les informations données dans la section 2.6.1.1.

[512] ©TARCHINI

Fig.91 – Les trois redresseurs protégés à l'aide de toile épaisse en coton [513]

Fig.92 – Redresseur n°2 stabilisé à l'aide de poutres en bois [514]

Dans l'idéal, les trois redresseurs devraient être entreposés sur un ou trois bacs de rétention dont la capacité devrait être supérieure à la quantité totale de mercure présent. Une autre alternative, consisterait à placer un bac de rétention (bassine en plastique) sous chaque ampoule en la suspendant, par exemple à l'armature du support en acier. Ceci permettrait, en cas de rupture des ampoules, de garder le mercure contenu et d'éviter ainsi qu'il se répande (si cette situation se produit l'intervention de décontamination serait beaucoup plus compliquée).

Après le traitement de nettoyage des trois redresseurs et de l'ampoule cassée, une série de spot tests (MercuryCheck® Test Kit – documentation en annexe 13) offerts par l'entreprise SKC®, ont été utilisés sur les surfaces en verre des ampoules, afin de mettre en évidence toute trace résiduelle de mercure. L'ensemble des tests effectués ont confirmé la présence de traces de mercure. Il semblerait donc qu'un nettoyage des surfaces avec des techniques courantes telles que du white-spirit et de l'éthanol n'ait pas permis d'éliminer la totalité du mercure résiduel. (notons que les spot tests employés permettent la détection de quantités minimes de mercure (1 à 2 μg sur une surface solide)[515]. La présence de mercure dans l'air de la réserve du musée (2.1μg/m^3) pourrait être responsable d'une redéposition da quantités infimes de mercure sur les surfaces.

[513] ©TARCHINI

[514] ©TARCHINI

[515] INTERNET[16]

Finalement, la mise en place de recommandations est indispensable et permet au musée d'appliquer les interventions permettant le suivi de cet appareillage : surveillance, conservation préventive, etc. D'autre part, ceci permet à toute personne impliquée dans une intervention (manipulation, restauration) sur cet ensemble d'éléments de prendre conscience du danger existant et de prendre les mesures nécessaires pour l'éviter. Ces recommandations comportent les informations relatives aux points suivants :

- Description sommaire de l'ensemble d'appareillage ;
- Identification des risques liés à la présence de mercure ;
- Recommandation pour la conservation préventive (conditions atmosphériques, stockage, surveillance) ;
- Recommandation pour la manipulation et le transport (directives spécifiques à l'objet, loi sur le transport de substances dangereuses) ;
- Recommandation lors d'éventuels travaux de conservation-restauration ;
- Recommandation lors d'un accident ;
- Liens internet pour des informations sur le mercure.

Le document comportant les recommandations, tel qu'il a été laissé au personnel du musée de l'industrie se trouve en annexe 19.

4.3 APPROCHE SYSTEMATIQUE POUR CE TYPE D'APPAREILLAGE

Malgré le fait que chaque objet possède ses propres problématiques, il peut être utile de donner des recommandations spécialement développées pour les redresseurs à vapeur de mercure. En effet, ce type d'appareillage comporte des spécificités techniques communes qui sont susceptibles d'engendrer un certain nombre de problématiques. Ces précautions s'appliquent autant à un appareillage entretenu régulièrement qu'à un nouvel arrivage ou à un objet dont les conditions d'entretien sont précaires. Dans les deux derniers cas, l'investigation doit être plus importante, car le risque de contamination est d'autant plus grand.

L'inspection du contenant est un point très important, dans le sens où les grandes quantités de mercure présentes sont une contrainte mécanique importante et représentent un danger potentiel d'autant plus grand. Cet élément doit être inspecté dans son ensemble, afin d'identifier d'éventuelles fissures ou ruptures pour une ampoule en verre ou des processus de corrosion et perforation en ce qui concerne une cuve métallique. Dans le cas d'une ampoule en verre, les soudures entre l'ampoule et les bras anodiques sont des zones sensibles. Les zones de jointure où pénètrent les électrodes doivent également être vérifiées, car malgré leur résistance importante, elles constituent de potentielles fuites de vapeurs de mercure. Une attention toute particulière doit être apportée aux jointures (électrode-couvercle, couvercle-cuve) des redresseurs à cuve métallique avec pompe à vide. Ces dernières ne sont jamais parfaitement étanches et le matériel constituant le joint (caoutchouc,

amiante) pourrait être dégradé. Dans le cas de la présence de jointures au mercure (électrode-couvercle, couvercle-cuve), l'ensemble des niveaux (contrôle) doivent être inspectés minutieusement, car ces derniers représentent des zones de fuite potentielles importantes : peuvent être absents se dévissent facilement, les verres peuvent être cassés ou absents. Les redresseurs à cuve métallique scellée possèdent des jointures beaucoup plus résistantes puisqu'elles ont été conçues pour garder une herméticité parfaite pendant une longue durée de fonctionnement. Les ampoules stockées dans leur boîte d'origine représentent également un risque important, car ces dernières ne sont généralement plus rangées en suspension dans la boîte, selon les recommandations du constructeur[516]. Plusieurs cas de ruptures ont pu être identifiés au niveau de la jointure des bras anodiques.

Les redresseurs à vapeur de mercure sont des objets qui ont généralement servi pendant de nombreuses années et qui peuvent avoir séjourné dans diverses conditions (situation, entretien) qui impliquent la possibilité d'accidents (explosion d'une ampoule, déversement de mercure, etc.). Lorsque l'on se trouve en possession d'un redresseur à vapeur de mercure qui n'a jamais fait l'objet d'une investigation, il est important d'observer attentivement toutes les surfaces de l'appareillage ainsi que les poussières qui y sont présentes (à l'aide d'un microscope), afin d'identifier l'éventuelle présence de particules de mercure. Les éléments faisant partie de l'ensemble, mais ne possédant pas de mercure dans leur principe de fonctionnement doivent également être examinés.

D'une manière générale, les redresseurs à vapeur de mercure doivent faire l'objet d'investigation régulière, afin de détecter le plus rapidement possible une éventuelle fuite de mercure sous forme liquide et/ou de vapeur.

4.4 POSSIBILITE DE REMISE EN FONCTIONNEMENT POUR CE TYPE D'APPAREILLAGE

La remise en fonctionnement d'un redresseur à vapeur de mercure est une forme de présentation envisageable dans le cadre d'une mise en exposition. Suite à une investigation menée dans le domaine des musées techniques et plus particulièrement les musées des transports urbains, divers musées ont été identifiés comme possédant un ou plusieurs redresseurs à vapeur de mercure dans leur institution. Certaines institutions telles que le Manx Electric Railway (Isle of Man) et le Brisbane Tramway Museum (Australie) les utilisent pour le redressement du courant électrique permettant de faire fonctionner les trams historiques. D'autres telles que The Museum of transport and Technology (Nouvelle Zélande), le Siemens Museum (München), le Landesmuseum für Technik und Arbeit (Mannheim) ainsi que le Kraftzentrale Klingerparks (Allemagne) ont remis en fonctionnement ce type d'appareillage dans le cadre d'une mise en exposition.

[516] ACEC, 1954

Le fonctionnement d'un redresseur à vapeur de mercure à ampoule de verre est toujours accompagné d'une luminescence intense caractéristique (fig.93 et 94).

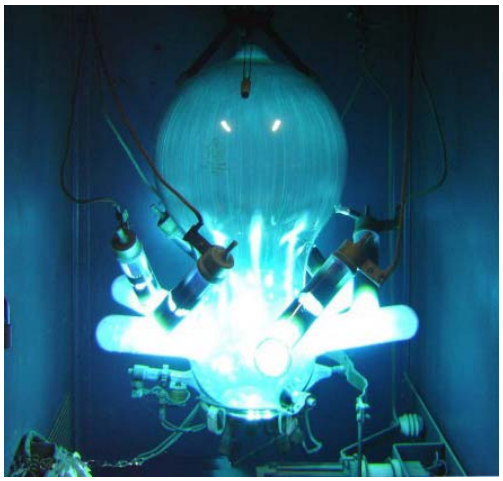


Fig.93 – Redresseurs à ampoule de verre en fonctionnement au Brisbane Tramway Museum [517]

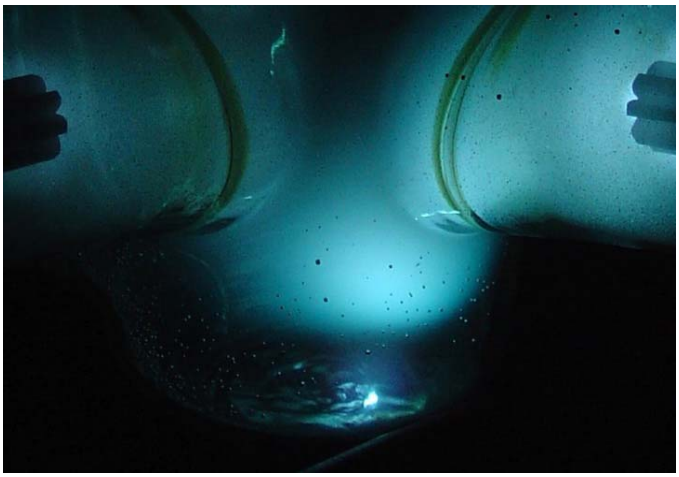


Fig. 94 – Base de l'ampoule avec tache cathodique sur le bain de mercure. Deux électrodes sont visible en haut de l'image [518]

La présentation de tels objets dans un cadre muséal apporte une information visuelle unique liée au fonctionnement de ce type d'appareillage, ce qui rend l'objet d'autant plus attractif et intéressant.

La remise en fonctionnement d'un redresseur à vapeur de mercure doit toujours être envisagée en sachant que cela engendre une usure importante de l'objet et repose sur diverses conditions :

- L'avis des professionnels du musée : l'objet remplit-il les conditions de conservation nécessaires pour une remise en fonctionnement ? Est-ce un objet représentatif unique ou existe-il d'autres modèles semblables ? Qui est capable de procéder à l'installation et la maintenance de l'appareil ?

- L'avis de techniciens et ingénieurs : l'appareil en question remplit-il les conditions nécessaires à une remise en fonction ?

- L'application des mesures de sécurité : qu'elles sont les mesures de sécurité nécessaires relatives au fonctionnement de ce type d'appareil et aux normes de sécurité d'un musée ?

Les ouvrages techniques spécialisés ainsi que les publications des constructeurs sont des supports indispensables à la compréhension du fonctionnement de ce type d'appareillage (la bibliographie de

[517] INTERNET[23]

[518] INTERNET[23]

ce travail donne quelques références). La remise en fonction d'un redresseur à vapeur de mercure devrait, dans l'idéal, être le résultat d'un travail multidisciplinaire impliquant la collaboration des professionnels de la conservation-restauration ainsi que de professionnels (techniciens/ingénieurs) spécialisés dans le domaine de l'instrumentation électrique à hautes tensions (et plus particulièrement les redresseurs à vapeur de mercure).

5 CONCLUSION

L'étude de cas considéré dans le cadre de ce travail (un ensemble de redresseurs à vapeur de mercure) a permis d'illustrer la problématique de la présence de mercure dans les collections techniques et industrielles. Les recherches effectuées sur les caractéristiques toxicologiques de ce matériau démontrent l'existence d'une réelle problématique de conservation-restauration. Certains éléments des redresseurs peuvent être la source d'une contamination qui est, dans la plupart des cas, liée au déversement ou à l'évaporation de mercure métallique, forme la plus courante dans ce type de collections. Les deux principales problématiques (objet cassé et présence de mercure au sein des poussières recouvrant les surfaces) identifiées sur l'appareillage du musée de la science et de l'industrie de Porto ne sont que deux des multiples contaminations qui peuvent survenir dans les collections muséales. L'origine de ces pollutions est souvent difficile à déterminer car elles ont pu se produire durant des périodes d'exercice ou de stockage temporaire. Le problème posé montre donc l'absolue nécessité de réaliser un diagnostic sur les objets contenant du mercure, et ceci dès leur entrée dans une collection. Ce premier examen doit permettre de se poser les bonnes questions quant aux premières interventions à mener pour prévenir tout risque majeur et de mettre en place une stratégie de conservation préventive incluant ici la protection efficace du personnel amené à s'approcher des appareillages considérés.

Les matériaux environnants à l'appareillage considéré ont pu être contaminés par le mercure sous forme liquide et/ou de vapeurs. En plus des risques que cela représente pour le personnel responsable de la manipulation de ce genre d'objets, ceci implique une deuxième problématique au sein des collections : l'altération des matériaux en présence de mercure. Dans notre cas de figure, les matériaux développés pour la construction de l'appareillage ont a priori une bonne résistance chimique à cet élément, mais la tenue à long terme de ces mêmes matériaux tout comme leur propre vieillissement méritent une étude approfondie. On a pu constater au cours de notre travail que la littérature spécialisée manque cruellement de références permettant de se rendre compte des risques réels. Des données existent mais celles-ci touchent principalement des matériaux neufs ; celles-ci doivent donc être corrigées, voire déterminées à nouveau lorsqu'on a affaire à des matériaux fortement vieillis. Il pourrait être intéressant d'approfondir ce sujet en étudiant les réactions qui concernent spécifiquement les matériaux présents dans les collections du patrimoine technique et industriel et les conditions dans lesquelles ces réactions pourraient survenir.

Dans l'ensemble, les objectifs fixés au départ concernant le travail à effectuer au musée de la science et de l'industrie ont été remplis. Ces derniers visaient la réalisation d'une investigation liée aux problématiques posées par la présence de mercure dans cet appareillage ainsi que la prise de mesures permettant de réduire les risques engendrés. Cette approche a pu être menée dans le cadre de collaborations avec divers professionnels engagés ou non dans le domaine de la conservation-restauration des objets patrimoniaux et instances compétentes locales qui ont permis d'approfondir l'investigation. Les moyens techniques et financiers à disposition n'ont pas toujours permis de prendre les actions nécessaires de manière immédiate et dans l'ordre logique des choses. Le contrôle de la qualité de l'air dans la réserve du musée de la science et de l'industrie est, par exemple, une mesure qui aurait dû être prise avant toute intervention dans ce local. Cependant, les actions ont toujours été planifiées en connaissance de cause et après la réalisation d'un travail d'investigation (entretiens, recherches d'informations) et lorsque le doute n'a pas pu être écarté, les précautions (protection personnelle) nécessaires ont toujours été prises. Les interventions pratiques effectuées ont permis d'éliminer les conditions représentant un risque direct pour le personnel du musée ainsi que la conservation des objets. La mise en place de mesures de conservation préventive et le développement d'une base documentaire sont les actions prises dans le but de réduire les risques liés à cet ensemble de redresseurs à vapeur de mercure sur le long terme. Malgré les efforts fournis, certains éléments auraient demandé un investissement beaucoup plus important (temps, argent) pour permettre une décontamination complète et certains matériaux ne peuvent jamais l'être complètement. Dans cette optique, il serait intéressant d'étudier ou de développer davantage les méthodes de décontamination de matériaux pollués, applicables aux objets de musée.

La recherche effectuée dans le domaine législatif ne semble pas démontrer l'existence d'une législation qui puisse poser une entrave à la conservation des objets contenant du mercure dans un musée. Cependant, les recommandations et réglementations émises par les organismes compétents en matière de protection de la santé dans le domaine professionnel et public doivent être prises en compte dans le cadre de la gestion de collections contenant du mercure.

Ce travail est loin de représenter un document complet sur la problématique de la présence de mercure dans les collections du patrimoine technique et indutriel. Cependant, il aborde le problème de manière étendue et apporte des résultats concluants qui devraient susciter un certain intérêt de la part des institutions ainsi que des personnes concernées. Enfin il montre la nécessité d'approfondir les recherches sur la problématique de manière plus ciblée.

6 BIBLIOGRAPHIE

6.1 REFERENCES CITEES

AGRICOLA, 1556
Agricola Georgius, Traduit par Hoover Clark Herbert et Hoover Henry Lou, De Re Metallica. Dover Publication Inc, New York,1950.

Arizona Instrument LLC, 2005
Arizona Instrument LLC, Jerome 431-X Mercury Vapor Analyser Operation Manual. 2005.

ACEC, 1954
Ateliers de Construction Electrique de Charleroi (ACEC), Redresseurs à vapeur de mercure à ampoule de verre : instructions pour l'installation, la mise en service et l'entretient. Belgique,1954.

AYLETT, 1975
Aylett B.J., The chemistry of zinc, cadmium and mercury. Pergamon Press, Oxford ,1975.

AZEVEDO, 1950
Azevedo Coutinho Braga C. De, Estudo fisico dos mutadores de vapor de mercúrio. Porto, Imprensa Moderna, 1950.

BARCLAY, 2001
Barclay R. and Ziomkiewicz B., Historic scientific instruments containing mercury, *in*, Rittenhouse, 1(2001), p21-30.

BERTHIER, 1908
Berthier A., Les nouveaux modes d'éclairage électriques : arc, incandescence, vapeur de mercure. H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1908.

BIDSTRUP 1964
Bidstrup, Lesley P., Toxicity of mercury an its compounds. Elsevier, Amsterdam,1964.

BOUCHONNET, 1911
Bouchonnet A., Zinc, cadmium, cuivre, mercure. Octave Doin et Fils, Paris,1911.

BRANCO ET SAMPAIO
Branco Maria M. e Sampaio Maria da Luz, Cronologia Freixo. Porto, Museu da Ciência e Indústria, *non publié*.

BRANCO ET SAMPAIO[2]
Branco Maria M. e Sampaio Maria da Luz, Objectivos. Porto, Museu da Ciência e Indústria, *non publié*.

BRANCO ET SAMPAIO[3]
Branco Maria M. e Sampaio Maria da Luz, Colecções. Porto, Museu da Ciência e Indústria, *non publié*.

BRUSSET H., 1977
Brusset H., Mercure. Masson, Paris,1977.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, 1999
Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Méthode d'analyse : détermination du mercure dans l'eau : méthode par spectrophotométrie d'absorption atomique et génération de vapeur. Québec, 1999.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, 1999
Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Méthode d'analyse : détermination du mercure : méthode par spectrophotométrie d'absorption atomique, formation de vapeur. Québec, 1977.

CCSST, 2002
Commission de la santé et de la sécurité du travail CSST, Guide d'utilisation d'une fiche signalétique. Bibliothèque nationale du Québec, 2002.

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 2005
Commission des Communautés Européennes, Communication de la commission au conseil et au parlement européen : stratégie communautaire sur le mercure. Bruxelle. 2005.

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 2005[2]
Commission des Communautés Européennes, La Commission propose une stratégie pour lutter contre la pollution par le mercure, qui prévoit notamment une interdiction des exportations. Bruxelles, 2005.

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 1998
Commission des Communautés Européennes, Directive 98/101/CE de la Commission du 22 décembre 1998 portant adaptation au progrès technique de la directive 91/157/CEE du Conseil relative aux piles et accumulateurs contenant certaines matières dangereuses. 1998.

CONSEIL FEDERAL SUISSE, 2005
Conseil fédéral Suisse, Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux. 2005.

CONSEIL FEDERAL SUISSE
Conseil fédéral Suisse, Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement. Modification de l'ordonnance du 9 juin 1986.

DUVAL C., 1968
Duval C., Le Mercure. coll. « Que sais-je ? », P.U.F., Paris,1968.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2002
Environnement Canada, Mercure: guide-information sur le mercure des installations fédérales. Ontario, 2002.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2002[2]
Environnement Canada, Le mercure dans l'environnement. http://ww.ec.gc.ca/MERCURY/SM/FR/sm-mcp.cfm, (consulté le 7 janvier 2006).

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY EPA, 1996
Environmental Protection Agency EPA, 42 USC 14301, Mercury Containing and Rechargeable Battery Management Act. 1996.

FEIGL FRITZ, 1958
Feigl F., Spot Tests in Inorganic Analysis. Elsevier, Amsterdam,1958.

FLINN, 2002
Flinn A., Alarms clocks, arrow heads and syrup of figs : potentially hazardous objects in museum collections, *in*, SSCR journal 13:1(2002), p10-15.

FLOREAL
Floréal Daniel, La spectrométrie d'absorption atomique.
www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/methodes/atome.htm#Introductio, (consulté le 15 août 2006).

FOUN & HELWIG, 1995
Found Christine and Helwig Kate, The reliability of spot tests for the determination of arsenic and mercury in natural history collections : a case study, *in*, Collection Forum, 11 :1(1995), p6-15.

FRIBERG, 1991
Friberg L., Inorganic mercury - Environmental health criteria 118. World Health Organization, Geneva,1991.

GUILLOT, 1996
Guillot Jean-Guy, Protocole de prélèvement des poussières pour l'évaluation de la contamination de locaux par le mercure métallique. Centre de toxicologie INSPQ, 1996.

GUILLOT, 1996[2]
Guillot Jean-Guy, Protocole pour l'évaluation du mercure métalllique dans l'air. Centre de toxicologie/INSPQ, 1996

GUILLOT, 1996[3]
Guillot Jean-Guy Déversement de mercure métallique, les étapes à suivre pour réussir une décontamination, *in*, Bulletin d'information toxicologique, 12 :1(avril 1996).

GOLDWATER , 1972
Goldwater Leonard J., Mercury : A history of quicksilver. York Press, Baltimore – Md, 1972.

HAWKS, 2004
Hawks C. and all., 2004. An Inexpensive methode to test for mercury vapor im herbarium cabinets, *in*, TAXON 3(2004), p783-790.

HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 2006
Health and Safety Executive, Methods for the determination of hazardous substances (MDHS). 2002.

HERSKIND & MORACK 1987
Herskind Curtis C. and Morack Marvin M., A history of mercury-arc rectifier in North America. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, cop., New York, 1987.

HOUTMEYERS, 2004
Houtmeyers Jules ed, Le livre blanc du chlore. Bruxelles, 2004.

ICC, 2002
Institut Canadien de Conservation (ICC), Le mercure présent dans les collections de musées. Notes de l'ICC 1/7, 2002.

INRS, 2003
Institut national de recherche et de sécurité INRS, Le mercure, prévention de l'hydrargyrisme. Condé-sur-Noireau, 2003.

INTERNET[1]
Internet1, http://acc6.its.brooklyn.cuny.edu/~scintech/mercury/WhatBigDeal.htm (consulté le 5 mai 2006)

INTERNET[2]
Internet2, Robert Toreki, www.ilpi.com/safety/mercury.html (consulté le 15 mai 2006)

INTERNET[3]
Internet1, http://wood.phy.ulaval.ca/french/liquid_mirrors/mercury.php (consulté le 16 mai 2006)

INTERNET[4]
Internet2, www.greenfacts.org/fr/glossaire/mno/methylmercure.htm (consulté le 15 mai 2006)

INTERNET[5]
Internet3, http://www.iut-lannion.fr/LEMEN/Mpdoc/CHIMIE/POLARO/TREDAN/pola.htm (consulté le 15 mai 2006)

INTERNET[6]
Internet4, http://acc6.its.brooklyn.cuny.edu/~scintech/mercury/WhatBigDeal.htm (consulté le 8 mars 2006)

INTERNET[7]
Internet6, Le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST), http://www.cchst.ca/reponsessst/chemicals/chem_profiles/mercury/ (consulté le 7 juin 2006)

INTERNET[8]
Internet7, United States National Library of Medicines, http://www.nlm.nih.gov/ (consulté le 6 août 2006)

INTERNET[9]
Internet7, http://www.ilpi.com/msds/ref/pel.html (consulté le 2 septembre 2006)

INTERNET[10]
Internet9 , http://physchem.ox.ac.uk/MSDS/glossary/twa.html (consulté le 2 septembre 2006)

INTERNET[11]
Internet9, Gestion des matières dangereuses (consulté le 8 septembre 2006): http://www.uqtr.ca/sppu/partie1_1,65_1,69.html

INTERNET[12]
Internet11, http://physchem.ox.ac.uk/MSDS/glossary/tlv.html (consulté le 10 août 2006)

INTERNET[13]
Internet12, Organisation Internationale du Travail (consulté le 2 septembre 2006)
http://www.ilo.org/public/french/protection/safework/cis/products/explim.htm

INTERNET[14]
Internet13, www.draeger.com (consulté le 5 septembre 2006)

INTERNET[15]
Internet14, www.msanet.com (consulté le 5 septembre 2006)

INTERNET[16]
Internet15, www.skcinc.com (consulté le 19 fevrier 2006)

INTERNET[17]
Internet16, NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) (consulté le 8 septembre 2006) : www.cdc.gov/niosh/nmam/method-m.html

INTERNET[18]
Internet17, The Occupational Safety and Health Adninistration (consulté le 8 septembre 2006) : www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id140/id140.html

INTERNET[19]
Internet18, PerkinElmer, Inc, (consulté le 4 septembre 2006) : www.perkinelmer.com

INTERNET[20]
Internet19, Nilfisk-Advance (consulté 7 mars 2006): www.nilfisk-advance.fr

INTERNET[21]
Internet20, http://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique (consulté le 27 février 2006)

INTERNET[22]
Internet21, http://fr.wikipedia.org/wiki/Ionisation (consulté le 27 février 2006)

INTERNET[23]
Internet22, www.quecksilberdampfgleichrichter (consulté le 27 juin 2006)

J. D., 1931
J. D., Les redresseurs à vapeur de mercure à ampoule en verre, *in*, A.C.E.C., Revue publiée par les ateliers de construction électriques de Charleroi, 129(1931), p.128-142.

KIMBERLY, 1977
Kimberly Huber, The Wisconsin Mercury SourceBook. Wisconsin Department of Natural Resources, Madison,1977.

LEBEAUX
Lebeaux Philippe, wwww.animailes.com (consulté le 5 septembre).

LECORGUILLIER, 1956
Lecorguillier J., Les redresseurs de courant dans l'industrie. Eyrolles, Paris, 1956.

LESKOVEC, 2004
Leskovec I., Idrija Municipal Museum : Maintenance and Preservation of the Technical Heritage of the Idrija Mercury Mine, *in,* Patrimoine de L'industrie 12(2004), p11-14.

MARECHAL, 1999
Maréchal Jean-François Le, La pollution par le mercure. résumé du cours du 4 octobre 1999, *non publié*, http://icar.univ-lyon2.fr/gric3/decouverte/document/NotesdeCours/mercure.htm (consulté le 17 mai 2006).

MAP & IDEM, 2002
Mercury Awareess Program MAP and Indiana Department of Environmental Management (IDEM), Mercury Spill Information and Cleanup Guidance. 2002.

MCAULIFTE, 1977
McAuliffe Charles A., The Chemistry of mercury. Macmillan, London, 1977.

MIQUEL, 2001
Miquel Gerard M., Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques, 2001, http://www.senat.fr/rap/l00-261/l00-261.html (consulté le 9 avril 2006).

MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005
Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2005. Le Mercure, 1ère partie *:* métal, mine et utilisations, *in*, Géochronique*,* 93(2005*),* Avril 2005.

MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2005[2]
Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Le mercure, 2ème partie: mercure et environnement, *in*, Géochronique*,* 93(2005*),* Avril 2005.

MINISTERE DE L'EMPLOI ET DE LA SOLIDARITE, 1999
Ministère de l'emploi et de la solidarité, *Circulaire DH/DGS n° 99-426 du 20 juillet 1999* relative à l'interdiction d'utiliser des thermomètres médicaux à mercure destinés à mesurer la température interne de l'homme dans les établissements de santé. 1999.

MOHAMMED ANDRE
Mohammed Andre, Peter Cooper Hewitt, www.ringwoodmanor.com/peo/ch/pch/pch.htm (consulté le 17 janvier 2006).

NEWMOA, 2003
Northeast Waste Management Officials' Association (NEWMOA), Instructions for cleaning up small liquid mercury spills in households. 2003.

NIOSH, 2005
The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards : Mercury compounds [except (organo) alkyls] (as Hg). NIOSH Publications, 2005.

NIOSH, 2005[2]
The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards : Mercury (organo) alkyl compounds (as Hg). NIOSH Publications, 2005.

ORCHARD, 1935
Orchard F., Mercury arc rectifier practice. Chapman & Hall, London, 1935.

PALMER, 2001
Palmer Peter T., 2001. A review of analytical methods for the determination of mercury, arsenic and pesticide residues on museum objects, *in*, Collection forum 16:1-2(2001), p25-41.

PARSONS & PERCIEVAL, 2005
Parsons Michael B. and Percieval Jeanne B., Mercury : sources, measurements, cycles, and effects. Mineralogical Association of Canada, Vancouver, 2005.

PARTRIDGE, 1949
Partridge J. H., Glass-to-metal Seals. Society of glass technology, Sheffield, 1949.

PASCAL DIR., 1962
Pascal Paul dir., Nouveau traité de chimie minérale. Tome V, Masson et Cie Ed., Paris, 1962.

POLOUJADOFF,1969
Pouloujadoff M.,Traitement de l'énergie électrique. 1969.

PUREWAL, 2001
Purewal V., 2001. The identification of four persistent and hazardous residues present on historic plant collections housed within the national museum and galleries of wales, *in*, Collection forum 1-2(2001), p77-86.

RISHER, 2003
Risher J.F., Elemental mercury and inorganic mercury compounds : human health aspect – Concise International Chemical Assessment Document 50. World Health Organisation, Genève, 2003.

SCHNABEL, 1898
Schnabel C., Traité théorique et pratique de métallurgie : zinc, cadmium, bismuth, étain, mercure…, Paris, Libraire polytechnique Baudry et Cie, 1898.

SCOULLOS, 2001
Scoullos Michael J., Mercury, cadmium, lead : handbook for sustainable heavy metals policy and regulation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.

SCOULLOS, 2001
Scoullos Michael J. and al, Mercury, Cadmium, Lead: Handbook for Sustainable Heavy Metals Policy and Regulation. Kluwer Academic Publischer, London, 2001.

SECRETARIAT DES NATIONS UNIES, 2003
Secrétariat des Nations Unies, Classification des mélanges de gaz d'après leurs effets toxiques. 2003

SIROIS, 2001
Sirois J., Pesticides residues in museum collections, *in*, Bulletin de l'ICC 28(2001), p14.

SIROIS[2], 2001
Sirois J., Analysis of museum objects for hazardous pesticides residues, *in,* Collection forum 17:1-2(2001), p49-66.

SIROIS[3], 2001
Sirois J., The analysis of museum objects for the presence of arsenic and mercury : non destructive analysis and sample analysis, *in*, Collection forum 16:1(2001), p65-75.

SUVAPRO, 2005
SuvaPro, Valeurs limite d'exposition au post de travail. Suisse, 2005.

THEAKSTON, 2000
Theakston Frank ed., Air quality guidelines for Europe. European series : No. 91, WHO regional publications, 2000.

UNEP CHEMICALS, 2002
UNEP Chemicals, Global Mercury Assessment. Geneva, 2002.

U.S. EPA , 1977
U.S. EPA & Wisconsin Dept. of Natural Resources, Draft Mercury Wisconsin Source Book. 1977.

VOLF, 1961
Volf M. B., Technical Glasses. Pitman, London, 1961.

Vignes, 2002
Vignes Jean-Louis et *al.*, Alumines poreuses nanostructurées : d'un nouveau procédé d'élaboration aux applications potentielles. Centre d'étude de chimie métallurgique, Ivry-sur-Seine, 2002.

WALLER ET AL, 2000
Waller R., Andrew K. and Tétreault J., Survey of gaseous polluant concentration distributions in mineral collections, *in*, Collection Forum 14:1-2(2000), p1-31.

WIKIPEDIA1
Wikipedia1, http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Cinnabar.jpg (consulté le 5 avril 2006)

WIKIPEDIA2
Wikipedia2, http://fr.wikipedia.org/wiki/Mercure_(%C3%A9l%C3%A9ment) (consulté le 3 janvier 2006)

WIKIPEDIA3
Wikipedia2, http://fr.wikipedia.org/wiki/Fulminate_de_mercure (consulté le 15 mai 2006)

WIKIPEDIA4
Wikipedia4, http://fr.wikipedia.org/wiki/Barom%C3%A8tre (CONSULTÉ EN AOÛT 2006)

WIKIPEDIA5
Wikipedia5, http://fr.wikipedia.org/wiki/Tensiom%C3%A8tre (consulté en août 2006)

WIKIPEDIA6
Wikipedia5, http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermom%C3%A8tre (consulté en août 2006)

WIKIPEDIA7
Wikipedia7, http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe (consulté en août 2006)

WERNER MEYER AG
Werner Meyer AG, Tableau périodique des Eléments.

ZELENC, 2004
Zelenc A., Idrija Municipal Museum : Restored Mine Machines and Devices of the Idrija Mercury Mine, *in,* Patrimoine de L'industrie 12(2004), p17-19.

3M, 2006
3M, Respirator selection guide. 2006.

6.2 RÉFÉRENCES NON CITÉES

Atwood David A., Recent developments in mercury science. Springer, Berlin, 2006.

Briggs D., Sell P.D., Block M. and Pons R. D., 1983. Mercury vapour : a health hazard in herbaria, *in*, New phytologist 94(1983), p453-457.

Bollinger Nancy, M.S., NIOSH respirator selection logic, NIOSH Publications Dissemination, Cicinnati, 2004.

Bormuth, Götz M., Die Zentrale von Massarelos : Massnahmen und Fahrplan zur Erhaltung der Gesamtanlage. Thesis. Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, Germany, 2004.

Brandt W. H. e Latimore E. S., Kovar, a Liga que Solda o Metal com o Vidro, *in,* O Engenheiro Westinghouse, Août 1946.

Constable Edwin C., 1982. Mercury, *in*, Coordination chemistry reviews 58(1982), p53-85 = Transition metal chemistry review 1982 part A.

Elliot R.P., Constitution of Binary Alloys : 1st Supplement. McGraw-Hill, New York, 1965.

Environmental, Safety and Health, Safe handling of mercury and mercury compounds. Volume II – document 15.5, 2000, revu en 2005.

Goldwater Leonard J., Newton and Mercury Poisoning, *in*, Science, New Series, 214 :4522(1981), p742.

Hansen M. and Anderko K., Constitution of Binary Alloys. McGraw-Hill, New York, 1958.

Hirayama C. and all., Metals in mercury. Pergamon, Oxford, 1986.

J. D., Le redresseur à ampoule de verre et la modernisation des petits réseaux de distribution, *in*, A.C.E.C., Revue publiée par les ateliers de construction électriques de Charleroi, 153(1931), p21-24.

Mc. Nerney J.J. and Buseck P. R., The detection of mercury vapour, *in*, Gold bulletin 4(1973), p106-107.

Odegaard Nancy, Scott Carroll and Werner s. Zimmt, Material characterisation tests for objects of art and archaeology. Archetype Publications, 2000.

Osteryoung Janet G., Intermetallic compounds in mercury. Pergamon Press, Oxford, 1992.

Risch R., De quelques principes physiques des mutateurs. 1938.

Stavroudis C., Mercury, the other heavy metal, *in*, WAAC newsletter 25:1(2003), p8-11.

Schiesser J. C., 25 ans de construction de mutateurs Brown Boveri, *in*, Revue Brown-Boveri, 5-6(1938), p83-93.

Séguier G., Les montages redresseurs : étude générale. Dunod, Paris, 1970.

Société Anonyme BROWN, BOVERI & Cie, Le redresseur à vapeur de mercure à grand débit : son développement er sa diffusion au cours des années 1910 à 1926. 1927.

Teago F.J. and Gill J.F., Marcury Arcs. Methuen, London 1936.

The Electric Construction Company ECC, The Mercury Arc Rectifier : A Technical Booklet. ECC, England, 1951.

Tsuguyoshi S., Nobumasa I. and Thomas Clarkson W., Advances in mercury toxicology. Plenum Press, cop. , New York, 1991.

Von Endt, David W. and Hawks Catherine A., Mercury in Bioscience Collections, *in*, Natural History Newsletter (1990), p19.

7 ANNEXES

A1 - LISTE DES MINERAUX CONTENANT DU MERCURE

TABLE 1-3. INTERNATIONAL MINERALOGICAL ASSOCIATION (IMA) APPROVED HG-CONTAINING MINERALS

Name	Formula	Name	Formula
Native elements and alloys		*Sulfides, including selenides and tellurides con't*	
Belendorffite	Cu_7Hg_6	Simonite	$TlHgAs_3S_6$
Eugenite	$Ag_{11}Hg_2$	Stalderite	$TlCu(Zn,Fe,Hg)_2As_2S_6$
Kolymite	Cu_7Hg_6	Temagamite	Pd_3HgTe_3
Leadamalgam	$HgPb_2$	Tiemannite	HgSe
Luanheite	Ag_3Hg	Tischendorfite	$Pd_8Hg_3Se_9$
Moschellands-bergite	Ag_2Hg_3	Tvalchrelidzeite	$Hg_3(As,Sb)_2S_3$
		Vaughanite	$TlHgSb_4S_7$
Paraschachnerite	Ag_3Hg_2	Velikite	Cu_2HgSnS_4
Potarite	PdHg	Vrbaite	$Tl_4Hg_3Sb_2As_8S_{20}$
Schachnerite	$Ag_{1.1}Hg_{0.9}$	+20 unnamed minerals	
Weishanite	$(Au,Ag)_3Hg_2$		
		Oxides	
Sulfides, including selenides and tellurides		Montroydite	HgO
Aktashite	$Cu_6Hg_3As_4S_{12}$		
Arzakite	$Hg_3S_2(Br,Cl)_2$	*Halides*	
Atheneite	$(Pd,Hg)_3As$	Aurivilliusite	$Hg^{1+}Hg^{2+}OI$
Balkanite	$Cu_9Ag_5HgS_8$	Calomel	Hg_2Cl_2
Brodtkorbite	Cu_2HgSe_2	Comancheite	$Hg_{13}(Cl,Br)_8O_9$
Capgaronnite	$HgAg(Cl,Br,I)S$	Eglestonite	$Hg^{1+}{}_6Cl_3O(OH)$
Christite	$TlHgAsS_3$	Haniwaltite	$Hg^{1+}{}_6Hg^{2+}[Cl,(OH)]_2O_3$
Cinnabar	HgS	Kadyrelite	$Hg_4(Br,Cl)_2O$
Coloradoite	HgTe	Kelyanite	$Hg_{36}Sb_3(Cl,Br)_9O_{28}$
Corderoite	$Hg_3S_2Cl_2$	Kleinite	$4[Hg_2NCl].Hg(SO_4,Cl).H_2O$
Danielsite	$(Cu,Ag)_{14}HgS_8$	Kuzminite	$Hg^{1+}{}_2(Br,Cl)_2$
Deanesmithite	$Hg^{1+}{}_2Hg^{2+}{}_3Cr^{6+}O_5S_2$	Kuznetsovite	$Hg^{1+}{}_2Hg^{2+}Cl(AsO_4)$
Donharrisite	$Ni_8Hg_3S_9$	Moschelite	$Hg^{1+}{}_2I_2$
Edoylerite	$Hg^{2+}{}_3Cr^{6+}O_4S_2$	Mosesite	$Hg_2N(Cl,SO_4,MoO_4,CO_3).H_2O$
Fettelite	$Ag_{24}HgAs_5S_{20}$	Pinchite	$Hg_5O_4Cl_2$
Galkhaite	$(Cs,Tl)(Hg,Cu,Zn)_{6(}As,Sb)_4S_{12}$	Poyarkovite	Hg_3ClO
Gortdrumite	$(Cu,Fe)_6Hg_2S_5$	Tedhadleyite	$Hg^{2+}Hg^{1+}{}_{10}O_4I_2(ClBr)_2$
Grechishchevite	$Hg_3S_2(Br,Cl,I)_2$	Terlinguacreekite	$Hg_3Cl_2O_2$
Grumiplucite	$HgBi_2S_4$	Terlinguaite	Hg_2ClO
Gruzdevite	$Cu_6Hg_3Sb_4S_{12}$	Vasilyevite	$Hg^{1+}{}_{10}O_6I_3Br_2Cl(CO_3)$
Hakite	$(Cu,Hg,Ag)_{12}Sb_4(Se,S)_{13}$		
Hypercinnabar	HgS		
Iltisite	$HgSAg(Cl,Br)$	*Carbonates*	
Imiterite	Ag_2HgS_2	Clearcreekite	$Hg^{1+}{}_3(CO_3)(OH).2H_2O$
Kenhsuite	$Hg_3S_2Cl_2$	Peterbaylissite	$Hg^{1+}{}_3(CO_3)(OH).2H_2O$
Laffittite	$AgHgAsS_3$	Szymańskiite	$Hg^{1+}{}_{16}(Ni,Mg)_6(CO_3)_{12}(OH)_{12}(H_3O)^{1+}{}_8.3H_2O$
Lawrentievite	$Hg_3S_2(Cl,Br)_2$		
Livingstonite	$HgSb_4S_8$	*Sulfates*	
Mazzettiite	$Ag_3HgPbSbTe_5$	Gianellaite	$Hg_4(SO_4)N_2$
Metacinnabar	HgS	Schuetteite	$Hg_3(SO_4)O_2$
Perroudite	$Hg_5Ag_4S_5(Cl,I,Br)_4$		
Petrovicite	$PbHgCu_3BiSe_5$	*Selenites – Tellurites – Sulfites*	
Polhemusite	$(Zn,Hg)S$	Magnolite	$Hg^{1+}{}_2Te^{4+}O_3$
Radtkeite	Hg_3S_2ClI		
Routhierite	$TlCuHg_2As_2S_6$		

Arsenates – Phosphates – Vanadates		*Others (silicates, antimonates, chromates)*	
Artsmithite	$Hg^{1+}{}_4Al(PO_4)_{2-x}(OH)_{1+3x}$	Edgarbaileyite	$Hg^{1+}{}_6Si_2O_7$
Chursinite	Hg_2AsO_4	Shakhovite	$Hg^{1+}{}_4Sb^{5+}O_3(OH)_3$
Tillmannsite	$(Ag_3Hg)(V,As)O_4$	Wattersite	$Hg_4{}^{1+}Hg^{2+}Cr^{6+}O_6$

A2 - LISTE DES PILES ET LEUR CONTENANCE EN MERCURE

Batteries and Mercury Content

From "Household Batteries Waste Management Study," by Gershman, Brickner, and Bratton, Inc., 1992; Managing Used Dry Cell Batteries: A Household Hazardous Waste Fact Sheet," MPCA

Type of Battery	Example of Use	Mercury Content
Alkaline		
Cylindrical or rectangular cells; the most commonly recognized battery. Labeled "alkaline."	Flashlight, radios, toys, calculators, remote controls, electronic games, portable radios and televisions, garage door openers.	Previously contained an average of 0.5 percent mercury to control the zinc reaction. 1993 Wisconsin Act 74 mandates that all alkaline manganese batteries sold in Wisconsin after January 1, 1996 be mercury free. Alkaline manganese button cell batteries to contain no more than 25 milligrams of mercury .
Zinc Carbon		
Cylindrical or rectangular cells; labeled as "General Purpose", "Heavy Duty" , or "Classic"	Best used in slow drain applications like clocks, garage door openers, pagers, and smoke detectors. Have much shorter life span than Alkaline batteries.	Use of mercury in these batteries is being phased out. 1993 Wisconsin Act 74 mandates that all zinc carbon batteries for sale after July 1, 1994 be mercury free.
Silver Oxide		
Button shaped with no distinguishing marks	Watches, calculators, toys, greeting cards, musical books	Contain about one percent mercury by weight. mercury use in these batteries is expected to be discontinued.
Zinc Air		
Usually button shaped. Identify by pin hole on one side	Hearing aids	Contain about one percent mercury by weight. mercury use in these batteries is expected to be discontinued.
Mercury Zinc (Mercuric Oxide)		
Button shaped, marked with ; larger mercuric oxide batteries look like 9-volt or fat AA batteries	Hearing aids, watches, and other items requiring a small battery. In consumer applications, mercuric oxide batteries are being replaced by zinc-air button cells. The larger mercuric oxide batteries are often used in military, hospital, or industrial uses.	Contain significant amounts of mercury ; total 33 to 50 percent by weight of the battery. Wisconsin Act 74, requires a collection system for those selling mercuric oxide batteries, and requires the recycling of mercuric oxide batteries unless no reasonable alternative exists.

A3 - FICHES INTERNATIONALES DE SECURITE POUR LE MERCURE ET SES PRINCIPAUX COMPOSES

INTERNATIONAL CHEMICAL SAFETY CARDS

MERCURY

0056
March 2001

CAS No: 7439-97-6	Quicksilver
RTECS No: OV4550000	Liquid silver
UN No: 2809	Hg
EC No: 080-001-00-0	Atomic mass: 200.6

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible. Gives off irritating or toxic fumes (or gases) in a fire.		In case of fire in the surroundings: all extinguishing agents allowed.
EXPLOSION	Risk of fire and explosion.		In case of fire: keep drums, etc., cool by spraying with water.
EXPOSURE		**STRICT HYGIENE! AVOID EXPOSURE OF (PREGNANT) WOMEN! AVOID EXPOSURE OF ADOLESCENTS AND CHILDREN!**	**IN ALL CASES CONSULT A DOCTOR!**
Inhalation	Abdominal pain. Cough. Diarrhoea. Shortness of breath. Vomiting. Fever or elevated body temperature.	Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest. Artificial respiration if indicated. Refer for medical attention.
Skin	MAY BE ABSORBED! Redness.	Protective gloves. Protective clothing.	Remove contaminated clothes. Rinse and then wash skin with water and soap. Refer for medical attention.
Eyes		Face shield, or eye protection in combination with breathing protection.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
Ingestion		Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	PACKAGING & LABELLING	
Evacuate danger area in case of a large spill! Consult an expert! Ventilation. Collect leaking and spilled liquid in sealable non-metallic containers as far as possible. Do NOT wash away into sewer. Do NOT let this chemical enter the environment. Chemical protection suit including self-contained breathing apparatus.	T Symbol N Symbol R: 23-33-50/53 S: (1/2-)7-45-60-61 UN Hazard Class: 8 UN Pack Group: III	Special material. Do not transport with food and feedstuffs.

EMERGENCY RESPONSE	STORAGE
Transport Emergency Card: TEC (R)-80G20c	Provision to contain effluent from fire extinguishing. Separated from food and feedstuffs. Well closed.

IPCS
International Programme on Chemical Safety

UNEP

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety and the European Commission
© IPCS 2000

SEE IMPORTANT INFORMATION ON THE BACK.

0056 **MERCURY**

IMPORTANT DATA

Physical State; Appearance
ODOURLESS, HEAVY AND MOBILE SILVERY LIQUID METAL.

Chemical dangers
Upon heating, toxic fumes are formed. Reacts violently with ammonia and halogens causing fire and explosion hazard. Attacks aluminium and many other metals forming amalgams.

Occupational exposure limits
TLV: 0.025 mg/m^3 (as TWA) (skin, A4) (ACGIH 2000).
MAK: 0.01 ppm; 0.1 mg/m^3; (1992).

Routes of exposure
The substance can be absorbed into the body by inhalation of its vapour and through the skin, also as a vapour!

Inhalation risk
A harmful contamination of the air can be reached very quickly on evaporation of this substance at 20°C.

Effects of short-term exposure
The substance irritates the skin. Inhalation of the vapours may cause pneumonitis. The substance may cause effects on the central nervous system
and kidneys. The effects may be delayed. Medical observation is indicated.

Effects of long-term or repeated exposure
The substance may have effects on the central nervous system and kidneys, resulting in irritability, emotional instability, tremor, mental and memory disturbances, speech disorders. May cause inflammation and discoloration of the gums. Danger of cumulative effects. Animal tests show that this substance possibly causes toxic effects upon human reproduction.

PHYSICAL PROPERTIES

Boiling point: 357°C
Melting point: -39°C
Relative density (water = 1): 13.5
Solubility in water: none

Vapour pressure, Pa at 20°C: 0.26
Relative vapour density (air = 1): 6.93
Relative density of the vapour/air-mixture at 20°C (air = 1): 1.009

ENVIRONMENTAL DATA

The substance is very toxic to aquatic organisms. In the food chain important to humans, bioaccumulation takes place, specifically in fish.

NOTES

Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is indicated. No odour warning if toxic concentrations are present. Do NOT take working clothes home.

ADDITIONAL INFORMATION

LEGAL NOTICE Neither the EC nor the IPCS nor any person acting on behalf of the EC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information

©IPCS 2000

MERCURIC OXIDE

0981
March 2001

CAS No: 21908-53-2
RTECS No: OW8750000
UN No: 1641
EC No: 080-002-00-6

Mercury (II) oxide
HgO
Molecular mass: 216.6

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible but enhances combustion of other substances. Gives off irritating or toxic fumes (or gases) in a fire.	NO contact with reducing agents.	In case of fire in the surroundings: all extinguishing agents allowed.
EXPLOSION			

EXPOSURE		**PREVENT DISPERSION OF DUST! AVOID ALL CONTACT!**	**IN ALL CASES CONSULT A DOCTOR!**
Inhalation	Cough.	Avoid inhalation of fine dust and mist. Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest. Refer for medical attention.
Skin	MAY BE ABSORBED! Redness.	Protective gloves. Protective clothing.	Remove contaminated clothes. Rinse skin with plenty of water or shower. Refer for medical attention.
Eyes	Redness.	Safety goggles, or eye protection in combination with breathing protection.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
Ingestion	Abdominal pain. Diarrhoea. Nausea. Vomiting.	Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Rinse mouth. Give plenty of water to drink. Rest. Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	**PACKAGING & LABELLING**	
Sweep spilled substance into containers; if appropriate, moisten first to prevent dusting. Carefully collect remainder, then remove to safe place. Do NOT let this chemical enter the environment. (Extra personal protection: P3 filter respirator for toxic particles.)	T+ Symbol N Symbol R: 26/27/28-33-50/53 S: (1/2-)13-28-45-60-61 Note: A UN Hazard Class: 6.1 UN Pack Group: II	Unbreakable packaging; put breakable packaging into closed unbreakable container. Do not transport with food and feedstuffs. Severe marine pollutant.

EMERGENCY RESPONSE	**STORAGE**
Transport Emergency Card: TEC (R)-61G64b	Separated from food and feedstuffs, reducing agents, chlorine and other reactive substances. See Chemical Dangers. Keep in the dark.

IPCS
International Programme on Chemical Safety

UNEP

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety and the European Commission
© IPCS 2000

SEE IMPORTANT INFORMATION ON THE BACK.

0981 **MERCURIC OXIDE**

IMPORTANT DATA

Physical State; Appearance
YELLOW OR ORANGE-YELLOW OR RED HEAVY CRYSTALLINE POWDER.

Chemical dangers
The substance decomposes on exposure to light, on heating above 500°C producing highly toxic fumes including mercury and oxygen, which increases fire hazard. Reacts violently with reducing agents, chlorine, hydrogen peroxide, magnesium (when heated), disulfur dichloride and hydrogen trisulfide. Shock-sensitive compounds are formed with metals and elements such as sulfur and phosphorus.

Occupational exposure limits
TLV (as Hg): 0.025 mg/m^3 A4 (skin) (ACGIH 2000).

Routes of exposure
The substance can be absorbed into the body by inhalation of its aerosol, through the skin and by ingestion.

Inhalation risk
Evaporation at 20°C is negligible; a harmful concentration of airborne particles can, however, be reached quickly when dispersed.

Effects of short-term exposure
The substance is irritating to the eyes, the skin and the respiratory tract.

Effects of long-term or repeated exposure
The substance may have effects on the kidneys, resulting in kidney impairment.

PHYSICAL PROPERTIES

Melting point (decomposes): 500°C
Density: 11.1 g/cm^3
Solubility in water: none

ENVIRONMENTAL DATA

In the food chain important to humans, bioaccumulation takes place, specifically in aquatic organisms. It is strongly advised not to let the chemical enter into the environment.

NOTES

Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is indicated. Do NOT take working clothes home. Red and Yellow mercuric oxide are common names.

ADDITIONAL INFORMATION

LEGAL NOTICE Neither the EC nor the IPCS nor any person acting on behalf of the EC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information

©IPCS 2000

MERCURIC SULFATE

0982
October 1999

CAS No: 7783-35-9	Mercury(II) sulfate
RTECS No: OX0500000	Mercuric bisulfate
UN No: 1645	$HgSO_4$
EC No: 080-002-00-6	Molecular mass: 296.7

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible. Gives off irritating or toxic fumes (or gases) in a fire.		In case of fire in the surroundings: all extinguishing agents allowed.
EXPLOSION			
EXPOSURE		**AVOID ALL CONTACT!**	**IN ALL CASES CONSULT A DOCTOR!**
Inhalation	Sore throat. Cough. Burning sensation. Shortness of breath. Laboured breathing. Weakness.	Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest. Half-upright position. Refer for medical attention.
Skin	MAY BE ABSORBED! Redness. Pain. Burning sensation. Skin burns. Blisters.	Protective gloves. Protective clothing.	Remove contaminated clothes. Rinse skin with plenty of water or shower. Refer for medical attention.
Eyes	Redness. Pain. Blurred vision. Severe deep burns.	Face shield, or eye protection in combination with breathing protection.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
Ingestion	Abdominal pain. Nausea. Vomiting. Diarrhoea. Metallic taste. Burning sensation. Shock or collapse.	Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Rinse mouth. Give a slurry of activated charcoal in water to drink. Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	PACKAGING & LABELLING	
Sweep spilled substance into containers. Carefully collect remainder, then remove to safe place. Do NOT let this chemical enter the environment. (Extra personal protection: chemical protection suit including self-contained breathing apparatus).	T+ Symbol N Symbol R: 26/27/28-33-50/53 S: (1/2-)13-28-45-60-61 Note: A UN Hazard Class: 6.1 UN Pack Group: II	Unbreakable packaging; put breakable packaging into closed unbreakable container. Do not transport with food and feedstuffs. Severe marine pollutant.

EMERGENCY RESPONSE	STORAGE
Transport Emergency Card: TEC (R)-61G64b	Separated from food and feedstuffs. Dry. Keep in the dark.

IPCS
International Programme on Chemical Safety

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety and the European Commission
© IPCS 2000

SEE IMPORTANT INFORMATION ON THE BACK.

0982	MERCURIC SULFATE

IMPORTANT DATA

Physical State; Appearance
WHITE CRYSTALLINE POWDER.

Chemical dangers
The substance decomposes under the influence of light and on heating to 450°C producing very toxic fumes of mercury and sulfur oxides. The solution in water is a medium strong acid. Reacts with hydrogen halides.

Occupational exposure limits
TLV (as Hg): 0.025 mg/m^3 (skin, A4) (ACGIH 1999).

Routes of exposure
The substance can be absorbed into the body by inhalation of its aerosol, through the skin and by ingestion.

Inhalation risk
Evaporation at 20°C is negligible; a harmful concentration of airborne particles can, however, be reached quickly when dispersed.

Effects of short-term exposure
The substance is corrosive to the eyes, the skin and the respiratory tract. Corrosive on ingestion. The substance may cause effects on the gastrointestinal tract and kidneys, resulting in tissue lesions and kidney damage. Medical observation is indicated.

Effects of long-term or repeated exposure
The substance may have effects on the kidneys, central nervous system and peripheral nervous system, resulting in ataxia, sensory and memory disturbances, tremors, muscle weakness and kidney impairment.

PHYSICAL PROPERTIES

Decomposes below melting point at 450°C
Density: 6.5 g/cm^3
Solubility in water: reaction
Auto-ignition temperature: >450°C

ENVIRONMENTAL DATA

The substance is very toxic to aquatic organisms. In the food chain important to humans, bioaccumulation takes place, specifically in aquatic organisms. The substance may cause long-term effects in the aquatic environment.

NOTES

Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is indicated.
Do NOT take working clothes home.

ADDITIONAL INFORMATION

LEGAL NOTICE Neither the EC nor the IPCS nor any person acting on behalf of the EC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information

©IPCS 2000

MERCUROUS CHLORIDE

0984
April 2000

CAS No: 10112-91-1	Dimercury dichloride
RTECS No: OV8740000	Calomel
UN No: 3077	Cl_2Hg_2
EC No: 080-003-00-1	Molecular mass: 472.09

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible.		In case of fire in the surroundings: all extinguishing agents allowed.
EXPLOSION			
EXPOSURE		**AVOID ALL CONTACT!**	**IN ALL CASES CONSULT A DOCTOR!**
Inhalation	Cough. Sore throat.	Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest. Refer for medical attention.
Skin	MAY BE ABSORBED! Redness.	Protective gloves. Protective clothing.	Remove contaminated clothes. Rinse skin with plenty of water or shower. Refer for medical attention.
Eyes	Redness.	Safety goggles.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
Ingestion	Abdominal pain. Diarrhoea. Vomiting. Metallic taste.	Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Rinse mouth. Induce vomiting (ONLY IN CONSCIOUS PERSONS!). Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	PACKAGING & LABELLING	
Sweep spilled substance into containers; if appropriate, moisten first to prevent dusting. Carefully collect remainder, then remove to safe place. (Extra personal protection: P3 filter respirator for toxic particles). Do NOT wash away into sewer.	Xn Symbol N Symbol R: 22-36/37/38-50/53 S: (2-)13-24/25-46-60-61 UN Hazard Class: 9 UN Pack Group: III	Unbreakable packaging; put breakable packaging into closed unbreakable container. Do not transport with food and feedstuffs. Severe marine pollutant.

EMERGENCY RESPONSE	STORAGE
Transport Emergency Card: TEC (R)-90G02	Separated from food and feedstuffs. Keep in the dark.

IPCS
International Programme on Chemical Safety

UNEP

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety and the European Commission
© IPCS 2000

SEE IMPORTANT INFORMATION ON THE BACK.

0984 **MERCUROUS CHLORIDE**

IMPORTANT DATA

Physical State; Appearance
WHITE CRYSTALLINE POWDER.

Chemical dangers
The substance decomposes slowly under influence of light producing mercuric chloride and mercury.

Occupational exposure limits
TLV (as Hg): 0.025 mg/m^3 (skin) A4 (ACGIH 1999).
MAK as Hg: 0.1 mg/m^3; BAT 25 Ág/l in blood; 100 Ág/l in urine (1999)
MAK as Hg STEL: 1 mg/m^3; (1999)
MAK: class Sh (1999)

Routes of exposure
The substance can be absorbed into the body by inhalation of its aerosol, through the skin and by ingestion.

Inhalation risk
Evaporation at 20°C is negligible; a harmful concentration of airborne particles can, however, be reached quickly when dispersed.

Effects of short-term exposure
The substance irritates the eyes, the skin and the respiratory tract.

Effects of long-term or repeated exposure
The substance may have effects on the central nervous system, kidneys and peripheral nervous system, resulting in ataxia, sensory and memory disturbances, fatigue, muscle weakness and kidney impairment.

PHYSICAL PROPERTIES

Sublimation point: 400-500°C
Density: 7.15 g/cm^3

Solubility in water, g/100 ml at 25°C: none

ENVIRONMENTAL DATA

The substance is very toxic to aquatic organisms. It is strongly advised not to let the chemical enter into the environment because it persists in the environment. Avoid release to the environment in circumstances different to normal use.

NOTES

Do NOT take working clothes home.
Cyclosan, M-C Turf fungicide are trade names.
Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is indicated.

ADDITIONAL INFORMATION

LEGAL NOTICE Neither the EC nor the IPCS nor any person acting on behalf of the EC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information

©IPCS 2000

MERCURIC CHLORIDE

0979
October 1999

CAS No: 7487-94-7	Mercury dichloride
RTECS No: OV9100000	Mercury (II) chloride
UN No: 1624	$HgCl_2$
EC No: 080-010-00-X	Molecular mass: 271.5

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible. Gives off irritating or toxic fumes (or gases) in a fire.		In case of fire in the surroundings: all extinguishing agents allowed.
EXPLOSION			
EXPOSURE		**AVOID ALL CONTACT!**	**IN ALL CASES CONSULT A DOCTOR!**
Inhalation	Cough. Sore throat. Burning sensation. Shortness of breath.	Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest. Half-upright position. Refer for medical attention.
Skin	MAY BE ABSORBED! Redness. Pain. Blisters. Skin burns.	Protective gloves. Protective clothing.	Remove contaminated clothes. Rinse skin with plenty of water or shower. Refer for medical attention.
Eyes	Pain. Redness. Blurred vision. Severe deep burns.	Face shield, or eye protection in combination with breathing protection.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
Ingestion	Abdominal cramps. Abdominal pain. Burning sensation. Metallic taste. Diarrhoea. Nausea. Sore throat. Vomiting. Shock or collapse.	Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Rinse mouth. Give a slurry of activated charcoal in water to drink. Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	PACKAGING & LABELLING	
Do NOT wash away into sewer. Sweep spilled substance into containers. Carefully collect remainder, then remove to safe place. Do NOT let this chemical enter the environment. (Extra personal protection:) chemical protection suit including self-contained breathing apparatus.	T+ Symbol N Symbol R: 28-34-48/24/25-50/53 S: (1/2-)36/37/39-45-60-61 Note: A UN Hazard Class: 6.1 UN Pack Group: II	Do not transport with food and feedstuffs. Severe marine pollutant.

EMERGENCY RESPONSE	STORAGE
Transport Emergency Card: TEC (R)-61G4b	Separated from food and feedstuffs, light metals.

IPCS
International Programme on Chemical Safety

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety and the European Commission
© IPCS 2000

SEE IMPORTANT INFORMATION ON THE BACK.

0979 **MERCURIC CHLORIDE**

IMPORTANT DATA

Physical State; Appearance
WHITE CRYSTALS OR POWDER.

Chemical dangers
The substance decomposes due to heating producing toxic fumes of mercury and chlorine fumes. Reacts with light metals.

Occupational exposure limits
TLV (as Hg): 0.025 mg/m^3 (skin, A4) (ACGIH 1999).

Routes of exposure
The substance can be absorbed into the body by inhalation of its aerosol, through the skin and by ingestion.

Inhalation risk
Evaporation at 20°C is negligible; a harmful concentration of airborne particles can, however, be reached quickly on dispersion.

Effects of short-term exposure
The substance irritates the respiratory tract and is corrosive to the eyes and the skin. Corrosive on ingestion. The substance may cause effects on the gastrointestinal tract and kidneys, resulting in tissue lesions, kidney failure, collapse and death. Medical observation is indicated.

Effects of long-term or repeated exposure
Repeated or prolonged contact may cause skin sensitization. The substance may have effects on the central nervous system peripheral nervous system and kidneys, resulting in ataxia, sensory and memory disturbances, fatigue, muscle weakness and kidney impairment.

PHYSICAL PROPERTIES

Boiling point: 302°C
Melting point: 276°C
Density: 6.5 g/cm^3

Solubility in water, g/100 ml at 20°C: 7.4
Vapour pressure, Pa at 20°C: 0.1
Octanol/water partition coefficient as log Pow: 0.1

ENVIRONMENTAL DATA

The substance is very toxic to aquatic organisms. In the food chain important to humans, bioaccumulation takes place, specifically in aquatic organisms. The substance may cause long-term effects in the aquatic environment.

NOTES

Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is indicated.
Do NOT take working clothes home.

ADDITIONAL INFORMATION

LEGAL NOTICE Neither the EC nor the IPCS nor any person acting on behalf of the EC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information

©IPCS 2000

MERCURIC NITRATE

0980
April 2000

CAS No: 10045-94-0
RTECS No: OW8225000
UN No: 1625
EC No: 080-002-00-6

Mercury (II) nitrate
Mercury dinitrate
HgN_2O_6 / $Hg(NO_3)_2$
Molecular mass: 324.7

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible but enhances combustion of other substances. Gives off irritating or toxic fumes (or gases) in a fire.		In case of fire in the surroundings: all extinguishing agents allowed.
EXPLOSION			

EXPOSURE		**AVOID ALL CONTACT!**	**IN ALL CASES CONSULT A DOCTOR!**
Inhalation	Cough. Sore throat. Burning sensation. Headache. Laboured breathing. Shortness of breath.	Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest. Half-upright position. Refer for medical attention.
Skin	MAY BE ABSORBED! Redness. Pain. Skin burns. Blisters.	Protective gloves. Protective clothing.	First rinse with plenty of water, then remove contaminated clothes and rinse again. Refer for medical attention.
Eyes	Redness. Pain. Blurred vision. Severe deep burns.	Face shield or eye protection in combination with breathing protection.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
Ingestion	Burning sensation. Abdominal pain. Diarrhoea. Nausea. Vomiting. Metallic taste.	Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Rinse mouth. Give a slurry of activated charcoal in water to drink. Induce vomiting (ONLY IN CONSCIOUS PERSONS!). Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	**PACKAGING & LABELLING**	
Sweep spilled substance into containers. Carefully collect remainder, then remove to safe place. Do NOT absorb in saw-dust or other combustible absorbents. Do NOT let this chemical enter the environment. (Extra personal protection: complete protective clothing including self-contained breathing apparatus).	T+ Symbol N Symbol R: 26/27/28-33-50/53 S: (1/2-)13-28-45-60-61 Note: A UN Hazard Class: 6.1 UN Pack Group: II	Unbreakable packaging; put breakable packaging into closed unbreakable container. Do not transport with food and feedstuffs. Severe marine pollutant.

EMERGENCY RESPONSE	**STORAGE**
Transport Emergency Card: TEC (R)-61G64b	Separated from combustible and reducing substances, food and feedstuffs. Keep in the dark.

IPCS
International Programme on Chemical Safety

UNEP

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety and the European Commission
© IPCS 2000

SEE IMPORTANT INFORMATION ON THE BACK.

0980 **MERCURIC NITRATE**

IMPORTANT DATA

Physical State; Appearance
COLOURLESS CRYSTALS OR WHITE, HYGROSCOPIC POWDER.

Chemical dangers
Shock-sensitive compounds are formed with phosphinic acid, ethanol and acetylene. The substance is a strong oxidant and reacts violently with combustible and reducing materials. The substance decomposes under influence of light.

Occupational exposure limits
TLV (as Hg): 0.025 mg/m^3 (skin) A4 (ACGIH 1999).
MAK as Hg: 0.1 mg/m^3; BAT 25 Ág/l in blood; 100 Ág/l in urine (1999)
MAK as Hg STEL: 1 mg/m^3; (1999)
MAK: class Sh (1999)

Routes of exposure
The substance can be absorbed into the body by inhalation, through the skin and by ingestion.

Inhalation risk
Evaporation at 20°C is negligible; a harmful concentration of airborne particles can, however, be reached quickly when dispersed.

Effects of short-term exposure
The substance is corrosive to the eyes the skin and the respiratory tract. Corrosive on ingestion. The substance may cause effects on the kidneys.

Effects of long-term or repeated exposure
Repeated or prolonged contact may cause skin sensitization. The substance may have effects on the central nervous system, kidneys and peripheral nervous system, resulting in ataxia, sensory and memory disturbances, fatigue, muscle weakness and kidney impairment.

PHYSICAL PROPERTIES

Melting point: 79°C
Density: 4.4 g/cm^3

Solubility in water: good

ENVIRONMENTAL DATA

The substance is very toxic to aquatic organisms. In the food chain important to humans, bioaccumulation takes place, specifically in aquatic organisms. It is strongly advised not to let the chemical enter into the environment because it persists in the environment.

NOTES

Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is indicated.
Do NOT take working clothes home.

ADDITIONAL INFORMATION

LEGAL NOTICE Neither the EC nor the IPCS nor any person acting on behalf of the EC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information

©IPCS 2000

A4 - TABLEAU DES PRINCIPALES INSTANCES COMPETENTES DANS LA GESTION DU MERCURE

QUELQUES PRINCIPAUX ORGANISMES IMPLIQUES DANS LA GESTION DE LA PROBLEMATIQUE DU MERCURE

Pays	Organisation	Adresse Internet
INTERNATIONAL	International Programme on Chemical Safety **IPCS**	http://www.inchem.org/
	International Commission on Occupational Health **ICOH**	http://www.icohweb.org/index.asp
	World Health Organisation **WHO**	http://www.who.int/en/
	United Nations Environmental Programme **UNEP**	http://www.unep.org/
	La direction générale de l'environnement	http://europa.eu.int/comm/environment/index_fr.htm
	The European Chemicals Bureau **ECB**	http://ecb.jrc.it/
	Organisation for Economic Co-operation and Development – Chemical Safety	http://www.oecd.org
	United Nation Economic Commission for Europe **UNECE** (environnement)	www.unece.org/env/welcome.html
	European Agency for safety and Health at work	http://osha.eu.int/
	Environment and Health	www.environmentandhealth.org/
CANADA	Centre Canadien d'hygiène et de sécurité du travail **CCHST**	http://www.cchst.ca/
	Santé Canada	http://www.hc-sc.gc.ca/
	Commission de la Santé et da le Sécurité du travail **CSST**	www.reptox.csst.qc.ca/SIMDUT.htm
	Environnement Canada	http://www.qc.ec.gc.ca/
	Comité d'élaboration des standards pancanadiens relatif au mercure	http://www.ccme.ca/index.html
	Conseil canadien des ministres de l'environnement **CCME**	http://www.ccme.ca/
	EcoSuperior	http://www.ecosuperior.com/

Pays	Organisation	Adresse Internet
CANADA	Centre de toxicologie du Québec	http://www.ctq.qc.ca/ctqintrf.html
	Northeast Waste Management Official's Association **NEWMOA**	http://www.newmoa.org/
	Transport Canada : marchandises dangereuses	www.tc.gc.ca/tmd/menu.htm
	Commission de la santé et de la sécurité du travail **CSST**	http://www.reptox.csst.qc.ca/
	Le Conseil de contrôle des renseignements relatifs aux matières dangereuses **CCRMD**	www.hmirc-ccrmd.gc.ca
	The Department of Environmental Health and Safety **EHS**	http://www.ehs.psu.edu/
	Réseau collaboratif de recherche sur le mercure	www.unites.uqam.ca/comern/
ETATS-UNIS	The American Conference of Governmental Industrial Hygienist **ACGIH**	http://www.acgih.org/home.htm
	Occupational Safety & Health Administration **OSHA**	www.osha.gov
	US Protection Agency **EPA**	www.epa.gov/
	The Agency for Toxic Substances and Disease Registry **ATSDR**	www.atsdr.cdc.gov
	Department of Environmental Quality **DEQ** (Michigan)	http://www.michigan.gov/deq/
	The Illinois Department of Public Health **IDPH**	http://www.idph.state.il.us/
	Mercury in schools	http://www.mercuryinschools.uwex.edu/
	Bowling Green State University	http://www.bgsu.edu/offices/envhs/
	The Thermostat Recycling Corporation **TRC**, by **NEMA**	http://www.nema.org/gov/ehs/trc/
	Great Lakes Regional Pollution Prevention Roundtable	http://www.glrppr.org/hubs/
	Clean Car Campaign	http://www.cleancarcampaign.org/mercury.shtml

Pays	Organisation	Adresse Internet
	Department of Health and Human Service **CDC**	www.cdc.gov/page.do
	OSH for Everyone	www.oshforeveryone.org/wsib/
	TOXNET	http://toxnet.nlm.nih.gov/
	Mercury Technology Services **MTS**	http://www.hgtech.com/
	Mercury Exposure	www.mercuryexposure.org
	Be Mercury Free	www.bemercuryfree.net
	The Department of Natural Resources **DNR**	www.dnr.state.wi.us/
	Environmental Health and Safety	www.ehs.psu.edu/
ROYAUME-UNI	Scottish Environmental Protection Agency **SEPA**	www.sepa.org.uk/about/index.htm
	Heath & Safety Executive	www.hse.gov.uk
FRANCE	Institut National de Recherche et de Sécurité **INRS**	http://www.inrs.fr/
	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques **INERIS**	http://www.ineris.fr/
SUISSE	Office fédéral de l'environnement **OFEV**	http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/fr/
	Office fédéral de la santé publique **OFSP**	http://www.bag.admin.ch/f/
	Organe de notification des produits chimiques	http://www.bag.admin.ch/anmeldestelle/f/
	La Suva	http://www.suva.ch/fr/
	Centre Suisse d'information toxicologique **TOX**	www.toxi.ch

A5 – PROPOSITION DE LOCATION POUR APPAREIL JEROME 431-X MERCURY ANALYSER

Jerome® Toxic Gas Analyzers

Rental Rates

431-X Mercury Analyzers

Daily	$ 175
Weekly	$ 525
Monthly	$1,575

631-X Hydrogen Sulfide Analyzers

Daily	$ 240
Weekly	$ 720
Monthly	$2,160

Jerome Communication Software and Data Logger

Daily	$ 40
Weekly	$ 120
Monthly	$ 360

Jerome 651 or 451 Continuous Monitoring System

Monthly	$3,400

All rental rates include FedEx 2nd day air shipping.

Arizona Instrument LLC®
1912 W. 4th Street • Tempe, AZ 85281 • (602) 470-1414 • (800) 528-7411 • Fax (480) 804-0656 • www.azic.com
Manufacturers of Computrac® Moisture Analyzers and Jerome® Toxic Gas Analyzers

A6 - TABLEAU REPRESENTANT DIVERSES METHODES DE DETECTION DIRECTE POUR LA MESURE DE LA CONCENTRATION EN VAPEUR DE MERCURE DANS L'AIR

INSTRUMENTS POUR LA DETECTION DE VAPEUR DE MERCURE DANS L'AIR

Noms	Principe de fonctionnement	Précision µg/m³	Fabriquant
Jerome 431-X	Amalgamation sur or	3 - 999	Arizona Instrument LCC http://www.azic.com/
Jerome J405	Amalgamation sur or	0.5-999	Arizona Instrument LCC http://www.azic.com/
Zeman Mercury analyser RA-915+	Spectrométrie atomique d'absorption	0.2 - 26	Hio Lumex Company, Inc www.chemanalysis.com
VM-3000 Mercury Vapor Monitor	Spectrométrie atomique d'absorption en vapeur froide	0.1 - 2000	Service Technologies, Inc. www.st2-service.com
Nippon EMP-1A	Spectrométrie atomique d'absorption en vapeur froide	1 - 5000	SMG/interlink www.smglink.com
Mercury Tracker 3000	Photométrie UV	0 - 1000	ST² Service Technologie, Inc. http://www.st2-service.com/
VM-3000 Mercury Vapor Analyzer	Photométrie UV	0 - 1000	ST² Service Technologie, Inc. http://www.st2-service.com/
Hg253 Portable Mercury Analyser	Absorption atomique Amalgamation sur or	Jusqu'à 0.1	Genesis Laboratory Systems, Inc. www.genlabsystems.com
Mercury Vapour Indicator MVI	Photométrie UV	0 - 2000	Ansyco Analytische Systeme und Componenten GmbH http://www.ansyco.de
Matheson-Kitagawa Toxic Gas Detector System	Tubes colorimétrique	100-2000	Mathesontrigas www.mathesontrigas.com
MSA	Tubes colorimétrique	100 - 800	MSA www.msa-europe.com
Drager	Tubes colorimétrique	50 - 2000	Dräger Safety www.draeger.com
GASTEC	Tubes colorimétrique	50 -13200	Elstar Prevention www.elstarprevention.com
Sensidyne	Tubes colorimétrique	100 -10000	SENSIDYNE www.sensidyne.com
ChromAir Passive Badge	Papier colorimétrique	125 - 1600	K & M Environmental www.kandmenvironmental.com
Safeair Passive Badge	Papier colorimétrique	Jusqu'à 10	K & M Environmental www.kandmenvironmental.com

A7 - PROTOCOLES POUR LA MESURE DE LA CONCENTRATION EN VAPEUR DE MERCURE DANS L'AIR

MERCURY 6009

Hg MW: 200.59 CAS: 7439-97-6 RTECS: OV4550000

METHOD: 6009, Issue 2 **EVALUATION: PARTIAL** **Issue 1: 15 May 1989**
Issue 2: 15 August 1994

OSHA : C 0.1 mg/m^3 (skin)
NIOSH: 0.05 mg/m^3 (skin)
ACGIH: 0.025 mg/m^3 (skin)

PROPERTIES: liquid; d 13.55 g/mL @ 20 °C; BP 356 °C; HP -39 °C; VP 0.16 Pa (0.0012 mm Hg; 13.2 mg/m^3) @ 20 °C; Vapor Density (air=1) 7.0

SYNONYMS: quicksilver

SAMPLING

SAMPLER: SOLID SORBENT TUBE (Hopcalite in single section, 200 mg)

FLOW RATE: 0.15 to 0.25 L/min

VOL-MIN: 2 L @ 0.5 mg/m^3
-MAX: 100 L

SHIPMENT: routine

SAMPLE STABILITY: 30 days @ 25 °C [1]

FIELD BLANKS: 2 to 10 field blanks per set

MEDIA BLANKS: at least 3 per set

ACCURACY

RANGE STUDIED: 0.002 to 0.8 mg/m^3 [2] (10-L samples)

BIAS: not significant

OVERALL PRECISION ($\hat{S}_{rT}$): not determined

ACCURACY: not determined

MEASUREMENT

TECHNIQUE: ATOMIC ABSORPTION, COLD VAPOR

ANALYTE: elemental mercury

DESORPTION: conc. HNO_3/HCl @ 25 °C, dilute to 50 mL

WAVELENGTH: 253.7 nm

CALIBRATION: standard solutions of Hg^{2+} in 1% HNO_3

RANGE: 0.1 to 1.2 µg per sample

ESTIMATED LOD: 0.03 µg per sample

PRECISION ($\bar{S}_r$): 0.042 @ 0.9 to 3 µg per sample [4]

APPLICABILITY: The working range us 0.01 to 0.5 mg/m^3 for a 10-L air sample. The sorbent material irreversibly collects elemental mercury. A prefilter can be used to exclude particulate mercury species from the sample. The prefilter can be analyzed by similar methodology. The method has been used in numerous field surveys [3].

INTERFERENCES: Inorganic and organic mercury compounds may cause a positive interference. Oxidizing gases, including chlorine, do not interfere.

OTHER METHODS: This replaces method 6000 and its predecessors, which required a specialized desorption apparatus [4,5,6]. This method is based on the method of Rathje and Marcero [7] and is similar to the OSHA method ID 145H [2].

REAGENTS:

1. Water, organics-free, deionized.
2. Hydrochloric acid (HCl), conc.
3. Nitric acid (HNO_3), conc.
4. Mercuric oxide, reagent grade, dry.
5. Calibration stock solution, Hg^{2+}, 1000 µg/mL. Commercially available or dissolve 1.0798 g of dry mercuric oxide (HgO) in 50 mL of 1:1 hydrochloric acid, then dilute to 1 L with deionized water.
6. Intermediate mercury standard, 1 µg/mL. Place 0.1 mL 1000 µg/mL stock into a 100 mL volumetric containing 10 mL deionized water and 1 mL hydrochloric acid. Dilute to volume with deionized water. Prepare fresh daily.
7. Stannous chloride, reagent grade, 10% in 1:1 HCl. Dissolve 20 g stannous chloride in 100 mL conc. HCl. Slowly add this solution to 100 mL deionized water and mix well. Prepare fresh daily.
8. Nitric acid, 1% (w/v). Dilute 14 mL conc. HNO_3 to 1 L with deionized water.

EQUIPMENT:

1. Sampler: glass tube, 7 cm long, 6-mm OD, 4-mm ID, flame sealed ends with plastic caps, containing one section of 200 mg Hopcalite held in place by glass wool plugs (SKC, Inc., Cat. #226-17-1A, or equivalent).
   NOTE: A 37-mm, cellulose ester membrane filter in a cassette preceding the sorbent may be used if particulate mercury is to be determined separately.
2. Personal sampling pump, 0.15 to 0.25 L/min, with flexible connecting tubing.
3. Atomic absorption spectrophotometer with cold vapor generation system (see Appendix) or cold vapor mercury analysis system.*
4. Strip chart recorder, or integrator.
5. Flasks, volumetric, 50-mL, and 100-mL.
6. Pipet, 5-mL, 20-mL, others as needed.
7. Micropipet, 10- to 1000-µL.
8. Bottles, biological oxygen demand (BOD), 300-mL.

* See SPECIAL PRECAUTIONS

SPECIAL PRECAUTIONS: Mercury is readily absorbed by inhalation and contact with the skin. Operate the mercury system in a hood, or bubble vented mercury through a mercury scrubber.

SAMPLING:

1. Calibrate each personal sampling pump with a representative sampler in line.
2. Break ends of sampler immediately prior to sampling. Attach sampler to pump with flexible tubing.
3. Sample at an accurately known rate of 0.15 to 0.25 L/min for a total sample size between 2 and 100 L.
   NOTE: Include a minimum of three unopened sampling tubes from the same lot as the samples for use as media blanks.
4. Cap sampler and pack securely for shipment.

SAMPLE PREPARATION:

5. Place the Hopcalite sorbent and the front glass wool plug from each sampler in separate 50-mL volumetric flasks.
6. Add 2.5 mL conc. HNO_3 followed by 2.5 mL conc. HCl.
   NOTE: The mercury must be in the oxidized state to avoid loss. For this reason, the nitric acid must be added first.
7. Allow the sample to stand for 1 h or until the black Hopcalite sorbent is dissolved. The solution will turn dark brown and may contain undissolved material.
8. Carefully dilute to 50 mL with deionized water. (Final solution is blue to blue-green).
9. Using a volumetric pipet, transfer 20 mL of the sample to a BOD bottle containing 80 mL of deionized water. If the amount of mercury in the sample is expected to exceed the standards, a smaller aliquot may be taken, and the volume of acid adjusted accordingly. The final volume in

the BOD bottle must be 100 mL. To prevent possible loss of mercury during transfer, place the pipet tip below the surface of the liquid in the BOD bottle.

CALIBRATION AND QUALITY CONTROL:

10. Prepare a minimum of two series (six levels each) of working standards covering the range 0.01 to 0.5 µg Hg per aliquot by adding known amounts of the intermediate standard to BOD bottles containing enough 1% nitric acid to bring the final volume to 100 mL.
11. Analyze the working standards together with the samples and blanks (steps 13 through 16). Analyze full set of standards at the beginning of the run, and a second set at the end of the run. Additional standards may be run intermediately during the analysis to confirm instrument response.
12. Prepare calibration graph (peak height vs. solution concentration, µg/sample).

MEASUREMENT:

13. Zero the spectrophotometer by removing the bubbler from the BOD bottle, allowing the baseline on the recorder to stabilize.
14. Place the bubbler in a BOD bottle containing 0.5 µg mercury in 100 mL 1% nitric acid. Adjust the spectrophotometer so that it will give a 75% to full-scale deflection of the recorder.
15. Vent the mercury vapor from the system.
16. Analyze standards, samples and blanks (including media blanks).
    a. Remove the bubbler from the BOD bottle.
    b. Rinse the bubbler with deionized water.
    c. Allow the recorder tracing to establish a stable baseline.
    d. Remove the stopper from the BOD bottle containing the next sample to be analyzed. Gently swirl the BOD bottle.
    e. Quickly add 5 mL 10% stannous chloride solution.
    f. Quickly place the bubbler into the BOD bottle.
    g. Allow the spectrophotometer to attain maximum absorbance.
    h. Vent the mercury vapor from the system.
    i. Place the bubbler into an empty BOD bottle. Continue venting the mercury until a stable baseline is obtained.
    j. Close the mercury vent.

CALCULATIONS:

17. Calculate the amount of mercury in the sample aliquot (W, µg) from the calibration graph.
18. Calculate the concentration C (mg/m ^{3}), of mercury in the air volume sampled, V (L):

$$C = \frac{W \cdot \frac{V_s}{V_a} - B}{V}.$$

Where: Vs = original sample volume (step 8; normally 50 mL)
Va = aliquot volume (step 9; normally 20 mL)
B = average amount of mercury present in the media blanks

EVALUATION OF METHOD:

Rathje and Marcero originally used Hopcalite (MSA, Inc.) as the sorbent material [7]. Later, Hopcalite was shown superior to other methods for the determination of mercury vapor [8]. Atmospheres of mercury vapor for the study were dynamically generated in the range 0.05 to 0.2 mg/m ^{3} and an adsorbent tube loading of 1 to 7 µg was used. The Hydrar material sometimes used is similar to Hopcalite. No significant difference in the laboratory analysis of mercury collected on the two sorbent materials was observed [9]. OSHA also validated a method for mercury using Hydrar [2]. An average 99% recovery, with $\bar{S}r = 0.042$, was seen for 18 samples with known amounts (0.9 to 3 µg) of mercury added (as $Hg(NO_3)_2$) [10]. No change in recovery was seen for samples stored up to 3 weeks at room temperature or up to 3 months at -15 °C; longer storage times were not investigated [10].

REFERENCES:

[1] Evaluation of Mercury Solid Sorbent Passive Dosimeter, Backup Data Report. Inorganic Section, OSHA Analytical Laboratory, Salt Lake City, Utah, 1985.
[2] Mercury in Workplace Atmospheres (Hydrar Tubes). Method ID 145H, Inorganic Section, OSHA Analytical Laboratory, Salt Lake City, UT, 1987.
[3] NIOSH/MRSB. Reports for analytical Sequence Nos. 5854, 5900, 6219, and 6311, NIOSH (Unpublished, 1987-1988).
[4] NIOSH Manual of Analytical Methods, 3rd. ed., Method 6000. (1984).
[5] NIOSH Manual of Analytical Methods. 2nd. ed., V. 4, S199, U.S. Dept. of Health. Education, and Welfare Publ. (NIOSH) 79-141 (1979).
[6] Ibid., V. 5, P&CAM 175, Publ. (NIOSH) 79-141 (1979).
[7] Rathje, A.O., Marcero, D.H. Improved hopcalite procedure for the determination of mercury in air by flameless atomic absorption, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 37, 311-314 (1976).
[8] McCammon, C.S., Edwards, S.L., Hull, R.D., Woodfin, W.J., A comparison of four personal sampling methods for the determination of mercury vapor, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 41, 528-531 (1980).
[9] Internal Methods Development Research, DataChem Laboratories, Inc., Salt Lake City, UT (1982).
[10] Eller, P.M., NIOSH, unpublished data (1987-88).

METHOD WRITTEN BY:

Keith R. Nicholson and Michael R. Steele, DataChem Laboratories, Inc., Salt Lake City, Utah, under NIOSH contract No. 200-87-2533.

APPENDIX: COLD VAPOR MERCURY ANALYSIS SYSTEM

1. The valve should direct the vented vapors to a hood or to a mercury scrubber system.
2. When the valve is opened to "Vent" the peristaltic pump should draw room air. Place a Hopcalite tube in the air intake to eliminate any mercury that may be present.
3. Adjust the peristaltic pump to a flow that will create a steady stream of bubbles in the BOD bottle, but not so great that solution droplets enter the tubing to the quartz cell.
4. If water vapor condenses in the quartz cell, heat the cell slightly above room temperature by wrapping it with a heating coil and attaching a variable transformer.
5. The bubbler consists of a glass tube with a bulb at the bottom, slightly above the bottom of the BOD bottle. The bulb contains several perforations to allow air to escape into the solution (in a stream of small bubbles). A second tube is provided to allow the exit of the vapor. The open end of the second tube is well above the surface of the liquid in the bottle. The two tubes are fixed into a stoppering device (preferably ground glass) which fits into the top of the bottle. A coarse glass frit can be used in place of the bulb on the first tube. However, it is more difficult to prevent contamination when a frit is used.
6. Replace the flexible tubing (Tygon or equivalent) used to connect the bubbler, cell, and pump periodically to prevent contamination from adsorbed mercury.

SKC® Chemical Fact File®

Elemental Mercury — OSHA ID-140

This method provides adequate sensitivity (qualitative detection limit 0.01 µg and quantitative detection limit 0.02 µg*) for measuring workplace atmospheric concentrations of elemental mercury. It offers the choice of collecting samples passively on a lightweight, economical dosimeter or actively on a sorbent tube. The passive dosimeter and sorbent tube each collect mercury vapor only. The sorbent tube may be used with a prefilter to collect both vapor and particulate mercury and can be used to determine compliance with the OSHA PEL of 0.1 mg/m³ (TWA) as total mercury (vapor + particulate).*

Required Equipment:

Active Method

1. An **Air Sampling Pump** capable of sampling at the recommended flow rate with the sampling medium in line, such as:
   - SKC 210 Series Pocket Pump® Sampler with Tube Holder 222-3-1
   - SKC AirChek® 2000 Sampler with Constant Pressure Controller Cat. No. 224-26-CPC, Low Flow Holder Cat. No. 224-26-01, and Protective Cover Cat. No. 224-29A
   - SKC AirChek 52 Sampler with Constant Pressure Controller Cat. No. 224-26-CPC, Low Flow Holder Cat. No. 224-26-01, and Protective Cover Cat. No. 224-29A
   - SKC Universal XR Series Sampler with Low Flow Holder Cat. No. 224-26-01 and Protective Tube Cover 224-29A
2. An **Airflow Calibrator**, such as:
   - SKC UltraFlo® Calibrator Cat. No. 709
   - DryCal® DC-Lite Flowmeter Cat. No. 717-01
3. SKC **Sorbent Tube** Cat. No. 226-17-1A†

Passive Method

1. SKC **Passive Sampler Sorbent Capsules** Cat. No. 520-02A
2. SKC **Reusable Capsule Holder** Cat. No. 520-03

Optional Equipment:

1. SKC **Tube Breaker** Cat. No. 222-3-50
2. SKC **Preloaded Filter Cassette** Cat. No. 225-3-01 (used in the active method as a prefilter to capture particulate mercury)
3. SKC **Collar Clip and Cable Tie** Cat. No. 225-13-6 (for use with sorbent tube-prefilter assembly)

SKC Application Guides:

1. Sampling Train - Sorbent Sample Tubes, #1168
2. Calibrating a Pump Using a Film Flowmeter, #1163
3. Calibrating a Pump Using an Electronic Calibrator, #1366
4. Prefilter and Sorbent Tube Sampling, #1164

Parameter	*Active Method* TWA*	*Passive Method* TWA*
Flow Rate	200 ml/min	20 ml/min
Sample Time	varies	8 hrs
Air Volume	3-100 L	9.6 L
OSHA PEL	0.1 mg/m³	0.1 mg/m³

(*Per 09/03/1996 OSHA Letter of Interpretation re: Standard 1910.1000 Table Z-2)

Sampling and Analysis:

Active Sampling

1. To set up a sorbent tube sampling train, break open both ends of a sorbent tube using the optional SKC sorbent tube breaker. Insert the sorbent tube into the rubber sleeve of the adjustable low flow holder or tube holder. The arrow on the sorbent tube indicates airflow and should point toward the tube holder and the pump. In the absence of an arrow, insert the end of the tube with the smallest sorbent section (backup section) into the tube holder. Connect the loose end of the flexible tubing to the inlet of a Constant Pressure Controller (CPC) if required by the pump for low flow sampling. Use tubing to connect the outlet of the tube or CPC to the pump inlet. *Request SKC Application Guide #1168 for more information on preparing sorbent tube sampling trains.*

Prefilter Option: The prefilter should be added to the sampling train in the following situations:

a. Sampling in workplaces that contain both chlorine and mercury.
b. Sampling to determine compliance to the OSHA PEL for total mercury
c. Sampling in an atmosphere where particulate mercury compounds may present a problem.
d. When the sorbent in the sorbent tube has migrated into the tube's glass wool plug prior to sampling

To set up a sorbent tube sampling train with prefilter, insert the opened sorbent tube into the adjustable low flow holder as directed above. Remove the plugs from a loaded filter cassette. Use a short length of Teflon® tubing to connect the inlet of the sorbent tube to the outlet of the filter cassette. Use a representative filter cassette during calibration. The recommended flow rate remains at 200 ml/min with the prefilter-sorbent tube assembly. *Request SKC Application Guide #1164 for more information on preparing a prefilter and sorbent tube sampling train.*

* *Detection limits can vary depending on the background of the sorbent.*

† *SKC proprietary sorbent: performance comparable to Hydrar® and Hopcalite.*

Publication 1677 Issue 0507

SKC Inc. 724-941-9701 **SKC South** 434-352-7149 **SKC Gulf Coast** 281-859-8050 **SKC West** 714-992-2780
www.skcinc.com

2. For calibrating the pump, use the sampling train described above except connect the sorbent tube inlet to the calibrator with a piece of flexible tubing. When using a prefilter, connect the inlet of the filter cassette to the calibrator. Use representative media. Calibrate the pump flow rate to the rate specified in the method. When calibration has been completed, remove representative media, cap it with the end caps provided, and save it for recalibration at the end of sampling. *Request SKC Application Guide #1366 or #1163 for more information on calibrating a pump.*

3. For sampling, set up a sampling train as above except use a new sorbent tube and do not break off the ends of the sorbent tube until ready to sample. The larger section of sorbent should be positioned away from the pump. Place the protective cover over the sorbent tube. Attach the clip on the protective cover to a worker's clothing near the breathing zone and the pump to the worker's belt. The sorbent tube should remain in a vertical position during sampling. Turn on the pump.

If using a prefilter, use Teflon tubing to attach a new filter cassette to the inlet of the sorbent tube. Do not unplug the cassette inlet until ready to sample. Loop the cassette through a cable tie and use the collar clip to attach the cassette to the worker's clothing in the breathing zone. Turn on the pump.

4. Sample at the recommended flow rate for the recommended period of time.

5. At the end of the sampling period, turn off the pump and note the ending time. Remove the media, seal it with the end caps provided, and record pertinent sampling information.

6. Verify pump flow rate with the representative sampling media in line to confirm that the flow rate has not changed by more than 5%.

Passive Sampling

1. Remove the back cover with a screwdriver or coin.

2. Remove the sorbent capsule from the pouch, and place it in the sampler housing with the mesh side facing toward the front of the sampler (area with diffusion holes). Keep the pouch in a safe place free from mercury contamination.

3. Place a clean foam disk in the back cover. Fit the back cover into the sampler housing.

4. Record name, date, and start time on the label included with the replacement sorbent capsules, and place it on the back of the sampler. Note other pertinent sampling information.

5. Using the clip, attach sampler to worker's clothing near breathing zone.

6. To begin sampling, remove the front sealing cap. Retain the cap in a safe place that is free from contamination. The recommended sampling time is four to eight hours.

7. When sampling is complete, replace the sealing cap and record the finish time on the label. Note other pertinent sampling information.

Submitting Samples:

1. Submit several field blanks from the same lot number as the media used as this sorbent does have a mercury background. Field blanks should be subjected to exactly the same handling as the samples (open, seal, and transport) except that no air is drawn through them.

2. Pack samples (tubes and cassettes sealed with caps and passive sorbent capsules in pouch), used passive dosimeter housings, field blanks, and all pertinent sampling information securely for shipment to a laboratory for analysis.

Storage:

Sorbent Tubes: Sorbent should be analyzed within 30 days of sampling.

Passive Samplers: Sorbent should be analyzed within 30 days of sampling. Do not store sorbent capsules or capsule holders in contaminated areas.

Analyzing Method:

Cold vapor-atomic absorption spectrophotometry (AAS)

Copyright 2004

Notice: *This publication is intended for general information only and should not be used as a substitute for reviewing applicable government regulations, equipment operating instructions, or legal standards. The information contained in this document should not be construed as legal advice or opinion nor as a final authority on legal or regulatory procedures.*

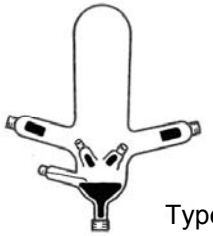
Publication 1677 Issue 0501

SKC Inc. 724-941-9701 **SKC South** 434-352-7149 **SKC Gulf Coast** 281-859-8050 **SKC West** 714-992-2780
www.skcinc.com

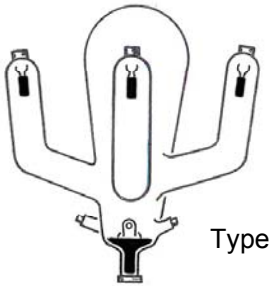
A8 - ILLUSTRATION DE LA SERIE DES AMPOULES HACKBRIDGE & HEWITTIC, POUR REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE, FABRIQUEES DANS LES ANNEES 1950

SERIE DES AMPOULES HEWITTIC DANS LES ANNEES CINQUANTE - D'après J. LECORGUILLIER

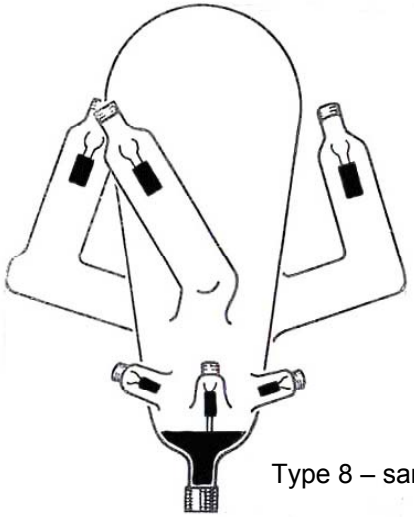
ECHELLE : 1/11



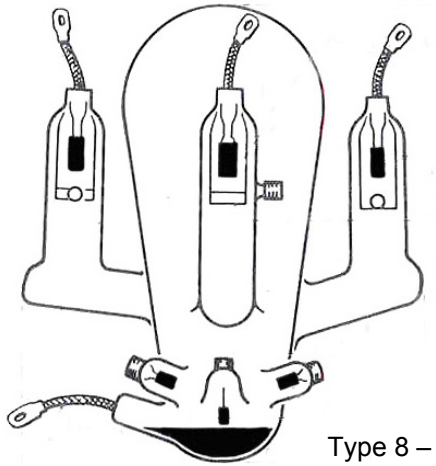
Type 1



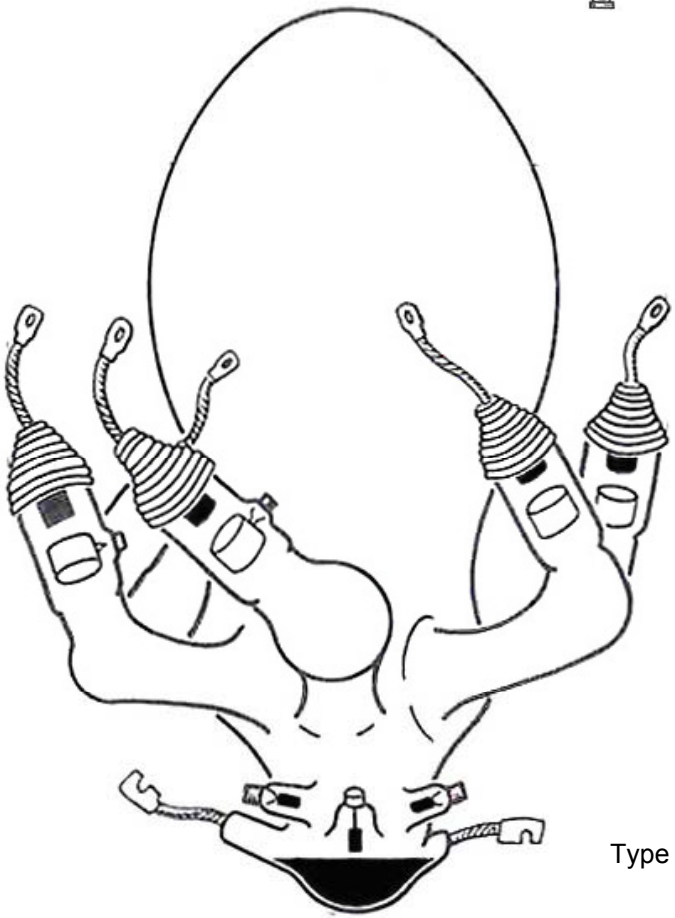
Type 2



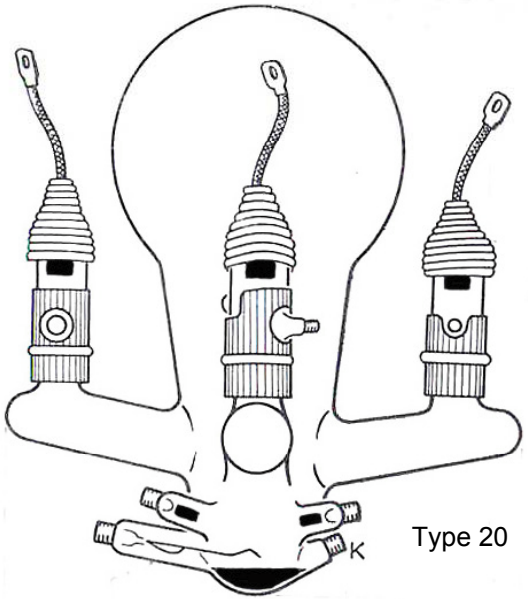
Type 8 – sans grille



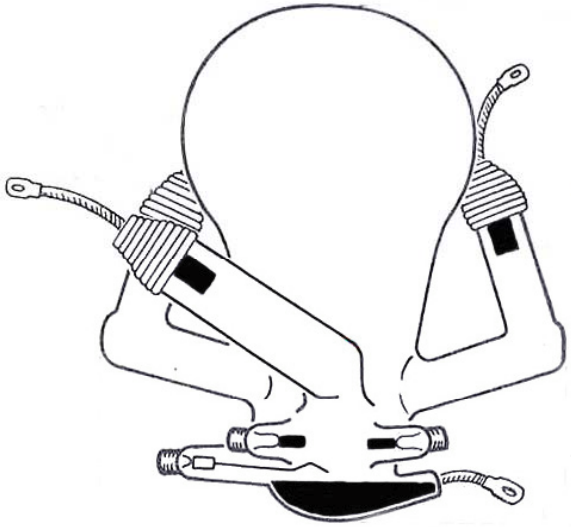
Type 8 – avec grille



Type 60



Type 20

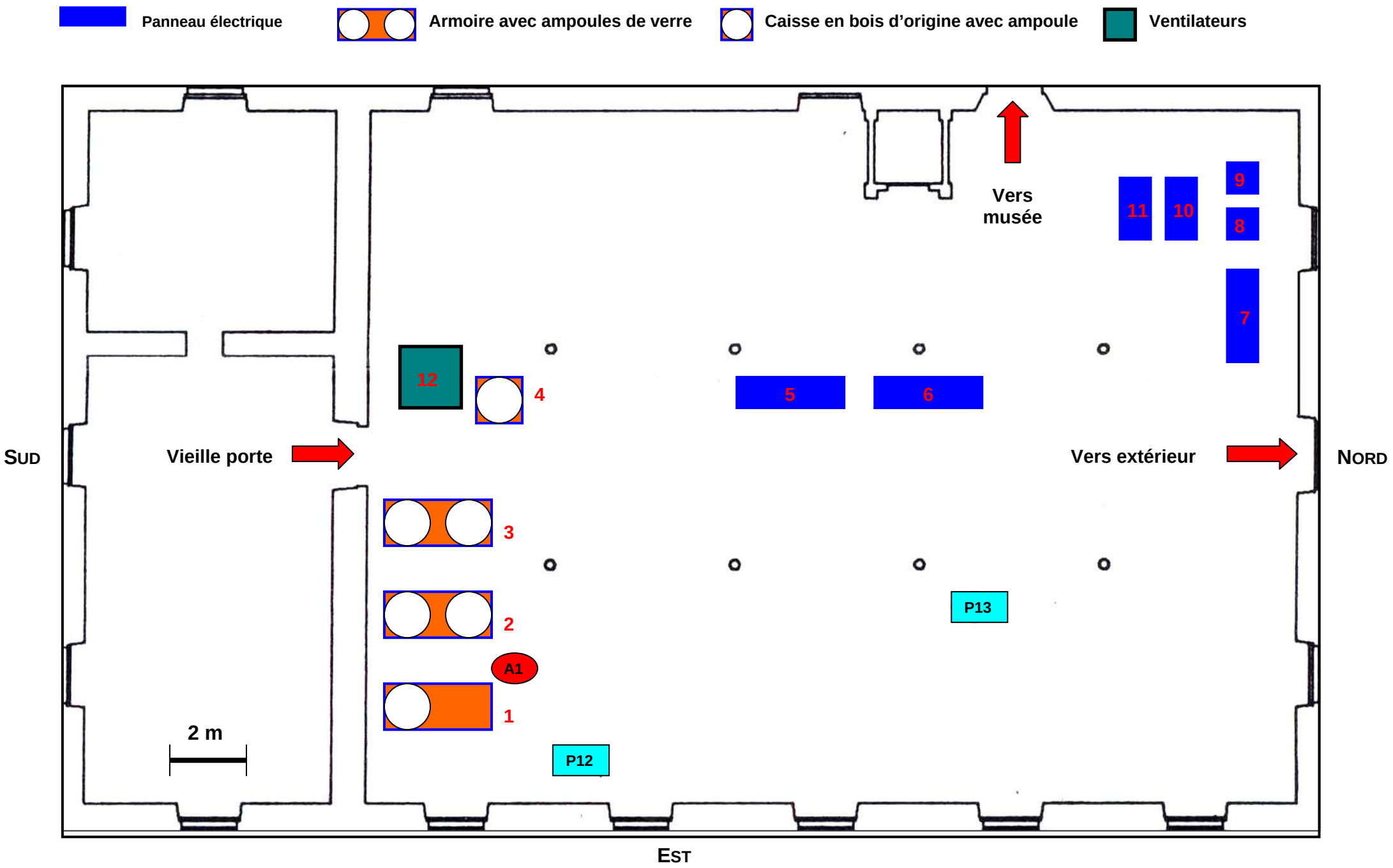


Type 15

A9 - TABLEAU ILLUSTRANT DIVERSES LIAISONS EMPLOYEES POUR LE SCELLEMENT DES ELECTRODES SUR LES AMPOULES EN VERRE DE REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE

APPLICATION	ITEM & DATE	DESCRIPTION	SIZE	CAPACITY (APPROX.)
GLASS BULB (ANODE & CATHODE SEALS)	1 (1901)	PLATINUM-TO-GLASS	WIRE	4 AMPERES
	2	DUMET-TO-GLASS (NICKEL STEEL CORE WITH COPPER COAT)	3 WIRES IN PARALLEL	2 ANODE 50 AMP.
	3 (ABOUT 1920)	MOLYBDEMUN-TO-STEEL	ROD 5 MM DIA.	6 ANODES 250 AMP.
	4	IRON/CHROMIUM ALLOY - TO- GLASS		2000 AMP.
	5	COPPER-TO-GLASS (THIN EDGE OF COPPER FUSED TO GLASS		
METAL TANK (ANODE SEALS)	6 (1910)	PORCELAIN-TO-STEEL WITH GASKETED JOINTS	4-6"DIA.	6 ANODES 4000 AMP.
	7	PORCELAIN-TO-STEEL WITH FUSED JOINT (SOLDERED)	SAME AS 6	SAME AS 6
	8 (1927)	MYCALEX MOULDED SEAL (LEAD BORATE GLASS & MICA-TO-STEEL)	3&4" DIA.	6 ANODES 4000 AMP.
	9	ENAMEL-TO-STEEL (VITREOUS ENAMEL & STEEL FUSED INTO A VACUUM TIGHT BUSHING)		
SEALED TUBES (ANODE SEALS)	10 (1930)	IRON/NICKEL/COBALT ALLOY-TO-GLASS ("FERNICO" OR "KOVAR" FUSED TO MATCHING BOROSILICATE GLASS)	4" DIA.	6 ANODES 2400 AMP.
METAL TANK (CATHODE SEALS)	11 (1910)	PORCELAIN-TO-STEEL WITH GASKETED JOINTS	24" DIA. X4" HIGH	5000 AMP. CONT. 7500 " 2HRS. 15000 " 5MIN.
	12	ENAMEL-TO-STEEL ENAMELED STEEL RING WITH GASKETED JOINTS	SAME AS 11	SAME AS 11
	13	SILICONE-TO-STEEL SILICONE CLAD STEEL RING WITH GASKETED JOINTS	SAME AS 11	SAME AS 11
TUBES FOR HVDC	14 (1950-1954)	PORCELAIN-TO-FERRO ALLOY, FUSED WITH GLASS		

A10 - PLAN DE LA RESERVE DU MUSEE DE LA SCIENCE ET DE L'INDUSTRIE REPRESENTANT LA REPARTITION DE L'APPAREILLAGE LIE AUX REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE


Panneau électrique
Armoire avec ampoules de verre
Caisse en bois d'origine avec ampoule
Ventilateurs
Vers musée
9
11
10
8
7
12
4
5
6
SUD
Vieille porte
Vers extérieur
NORD
3
2
A1
1
P13
2 m
P12
EST

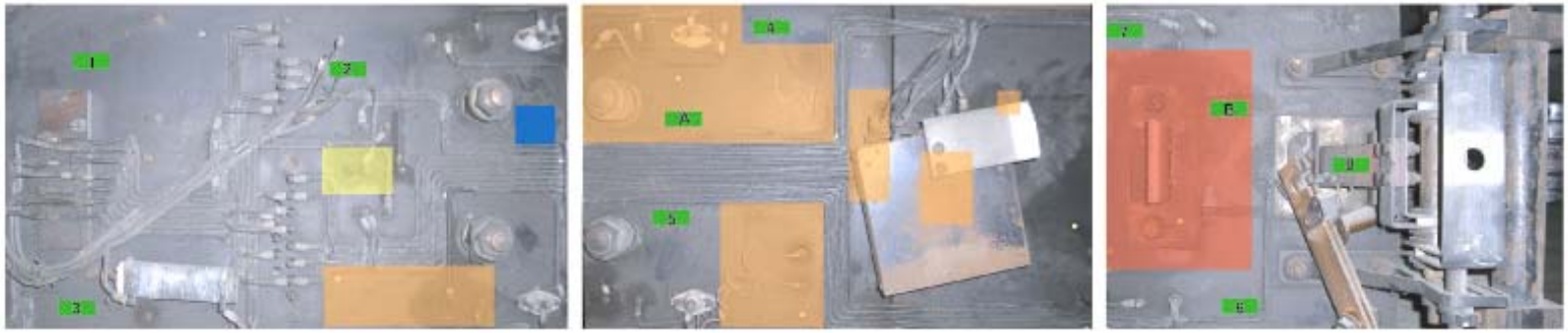
A11 - SCHEMA REPRESENTANT LA REPARTITION DES PARTICULES DE MERCURE SUR LES TABLEAUX ELECTRIQUES 6 ET 7 DES REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE DU MUSEE DE LA SCIENCE ET DE L'INDUSTRIE

REPARTITION DES BILLES DE MERCURE IDENTIFIABLE A L'OEUIL NU: 1 - 10 billes 10 - 50 billes + de 50 billes

ECHANTILLON DE POUSSIERE PRELEVE SUR LAMELLE MICROSCOPIQUE:

ECHANTILLON DE POUSSIERE PRELEVE DANS TUBE :

PANNEAU 6



PANNEAU 7

A12 - LISTE DES INSTITUTIONS CONTACTEES POUR LA REALISATION D'ANALYSES DE LABORATOIRE A PORTO

CONTACTES REALISES DANS LE BUT D'EFFECTUER DES ANALYSES SUR CERTAINS MATERIAUX

Nom de l'institution	**Contact**
Instituto Português de Conservação e Restauro IPCR	Eng[a] Isabel Ribeiro : isarib@ipcr.pt
Universidade Nova de Lisboa – Departamento de Conservação e Restauro – Laboratorio vidro	Eng[o] Pires de Matos : pmatos@itn.pt
Universidade Tecnica de Lisboa – Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT	Secretaria : cristina.tomas@alfa.ist.utl.pt Labo microscopia : pac@ist.utl.pt
Universidade de Coimbra – Faculdade de Ciências e Technologia – Departamento de Fisica – Centro de Estudos de Materiais por Difraçcão de Raiox x	Prof[a] Dr[a] Maria Margarida Ramalho R. de Costa : guida@pollux.fis.uc.pt
Universidade do Aveiro – Unidade de Investigação em Materiais Ceramicos	uimc@cv.ua.pt
Universidade Catholica Portuguesa – Escola Superior de Biotechnologia	Carla Felizardo : cfelizardo@porto.ucp.pt
Universidade da Beira Interior – Departamento de Fisica - Centro de Optica	coptica@dfisica.ubi.pt
Centro de Estudo de materiais da Universidade do Porto CEMUP	Dir. Carlos Pinto Moreira de Sá : cmsa@cemup.up.pt

A13 – DOCUMENTATION SUR LES BADGES D'ECHANTILLONAGE ET LES SPOTS TEST SKC® POUR LA DETECTION DE MERCURE

Publication 1096 Rev 0312

Inorganic Mercury Passive Sampler

Validated by OSHA Method ID 140

- **High capacity**
- **Extensively field tested**
  - Validation based on OSHA Method ID 140
  - Specified in Health and Safety Executive (UK) Method MDHS 16/2
  - Meets NIOSH and OSHA standards
- **Lowest cost per measurement available**
  - Reusable housing and capsule refills
- **Easy-to-use**
  - Attach to a worker's collar or pocket
  - No pump needed
- **Lightweight**
  - Weighs 0.5 ounce
- **Long-term sampling up to 120 hours**
- **High accuracy and sensitivity**
  - Positive analysis of mercury
  - Limit of detection: 0.01 µg*†
  - Limit of quantitation: 0.04 µg*†
  - Sampling and experimental error: ± 8.6%
  - Removable sorbent capsule eliminates false high readings due to contamination of badge housing
  - Background: 0.02µg/200mg section
- **No moisture or chlorine interferences**
  - Extensive field testing and chamber studies show accuracy without interference from either moisture or chlorine
- **Simple analysis**
  - Uses standard laboratory equipment and analytical methods

** Limits may vary with analysis and instrumentation.*
† For sampling low levels of mercury, use a sorbent tube.

Several methods for determining personal exposure levels of inorganic mercury vapor are available. Sampling methods that employ passive samplers are desirable because they are simple to perform and eliminate the need for sampling pumps. Unfortunately, most passive samplers must be returned to the manufacturer for analysis by proprietary procedures.

SKC, however, offers a mercury sampler that is designed for analysis using standard laboratory equipment; therefore, the cost per measurement is kept to an absolute minimum compared to other samplers. The 520 Series Mercury Sampler measures worker exposure levels as a Time-Weighted Average (TWA) and permits the positive analysis of mercury vapor.

SKC®

SKC Inc. 724-941-9701 **SKC West** 714-992-2780 **SKC Gulf Coast** 281-859-8050 **SKC South** 434-352-7149
www.skcinc.com

Inorganic Mercury Passive Sampler

Validated by OSHA Method ID 140

The OSHA Laboratory in Salt Lake City, Utah, conducted an evaluation of the SKC mercury sampler over a broad range of mercury concentrations and sampling times. The evaluation consisted of the following major experiments: validation of the sampling rate, desorption efficiency, precision and accuracy, storage stability, reverse diffusion, face velocity dependence, and comparison of methods. The method of reference for this evaluation was OSHA ID 140.

Mercury vapor enters the sampler by positive, controlled diffusion so that a known sample volume is taken for a given period of time. Mercury is completely adsorbed onto the solid sorbent. The sorbent capsule is then taken to an accredited laboratory where the sorbent is dissolved in acid and analyzed by flameless atomic absorption. The sampler holder is cleaned and reused, thereby reducing sampling cost.

Operation

1. Remove the sorbent capsule from the sealed pouch and insert it into the sampler housing. Attach the sampler near the worker's breathing zone.

2. When sampling is completed, remove the capsule from the holder and reinsert it into the original packaging for shipment to an accredited laboratory.

3. Clean the sampler housing and fit with a new sorbent capsule. The sampler can then be reused.

References:

Method No. ID 140, Occupational Safety and Health Administration, Inorganics Division, OSHA Technical Center, Salt Lake City, Utah.

A. O. Rathje and D.H. Marcero, "Improved Hopcalite Procedure for the Determination of Mercury Vapor in the Air by Flameless Atomic Absorption," Am. Ind. Hyg. Assoc. J. Volume 37 (1976), pp. 311-314.

Method MDHS 16/2, Health and Safety Executive (HSE), United Kingdom

Notice: *This publication is intended for general information only and should not be used as a substitute for reviewing applicable government regulations, equipment operating instructions, or legal standards. The information contained in this document should not be construed as legal advice or opinion nor as a final authority on legal or regulatory procedures.*

Interferences

Extensive field testing and chamber studies have shown that excellent accuracy and precision can be achieved with these samplers without interference from moisture or other gases, including chlorine.

Ambient Temperature

The sampling rate will vary with ambient temperature changes that affect the diffusion rate. This effect is small, but may be significant if sampling at unusually high or low temperatures. The diffusion coefficient D is proportional to the temperature to the 1.5 power ($D \alpha T^{1.5}$). This factor is taken into account in the calculation used in the OSHA method.

Wind Velocity

The sampling rate will remain substantially constant over a range of wind velocity from 25 to 750 ft/min. In very still air conditions (below 25 ft/min), the sampling rate will drop by up to 30%. If very high wind velocities (in excess of 750 ft/min) are expected, additional shielding may be necessary to prevent erratic increases in sampling rate.

Ambient Pressure Changes

The sampling rate varies with ambient pressure changes that affect the diffusion rate. The diffusion coefficient is inversely proportional to the ambient pressure. This factor is taken into account in the calculation used in the OSHA method.

Presence of Other Gases

Mercury sampling on this sorbent has been shown to be unaffected by the presence of other gases, including chlorine. Note, however, that complex interactions in the atmosphere may reduce the total free elemental mercury present to be sampled.

Ordering Information

Description	Cat. No.
Sorbent Capsules contain Anasorb® C300*	**520-02A**
Reusable Capsule Holder	**520-03**

** SKC proprietary sorbent; comparable to Hydrar and Hopcalite*

SKC®

SKC Inc. 724-941-9701 **SKC West** 714-992-2780 **SKC Gulf Coast** 281-859-8050 **SKC South** 434-352-7149

www.skcinc.com

863 Valley View Road, Eighty Four PA 15330 USA
Tel: 724-941-9701 Fax: 724-941-1369 e-mail: skctech@skcinc.com

Passive Sampler for Mercury
Catalog No. 520 Series

Introduction

The 520 Series Passive Sampler for Mercury is a lightweight, reusable personal sampler designed to be worn in the breathing zone of individuals who are potentially exposed to mercury vapor.

The sample enters the sampler by positive controlled diffusion. The sorbent is then analyzed by flameless atomic absorption. The sampler housing can be cleaned and reused with a new sorbent capsule. Validation of the SKC 520 Series Passive Sampler for Mercury is based on OSHA ID 140.

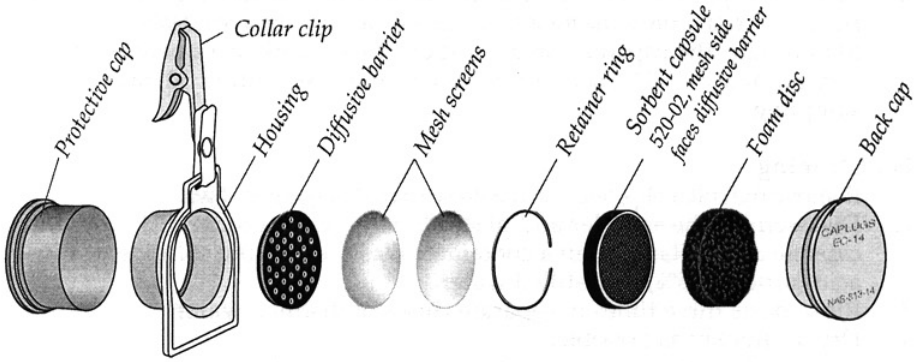


Figure 1. Complete Assembly of Passive Sampler for Mercury

Specifications*

Sorbent:	Anasorb® C300 (SKC proprietary sorbent; comparable to Hydrar® and Hopcalite)
Background:	0.02 µg/200 mg section
Limit of Detection:	0.01 µg†
Limit of Quantitation:	0.04 µg†
Capacity:	> 30 ug mercury per capsule
Breakthrough volume:	> 1500 liters of air
Sampling and experimental error:	± 8.6%

**Some specifications based on a study conducted by the Health and Safety Executive (HSE) in the U.K. as an update to Method MDHS 16.*

† Limits may vary with analysis and instrumentation

***Note:** For sampling low levels of mercury, use a sorbent tube.*

Preparing the Sampler

For Sampling

1. Remove the back cover with a screwdriver or a coin.
2. Remove the sorbent capsule from the pouch, and place it in the sampler housing with the mesh side facing diffusive barrier. Keep the pouch in a safe place free from mercury contamination.
3. Place a clean foam disk in the back cover. Then, fit the back cover into the sampler housing.
4. Record name, date and start time on an I.D. label (included with the replacement sorbent capsules), and place it on the back of the sampler. Note any other pertinent sampling information.
5. Using the clip, attach to clothing of individual near breathing zone. Or place in desired location for area sampling.
6. To begin sampling, remove protective cap. Retain the cap in a safe place free from contamination. Recommended sampling time is four to eight hours.
7. When sampling period is complete, replace sealing cap and record finish time on I.D. label. Note any other pertinent sampling information.

Caution: Avoid excessive agitation of the sampler

For Analysis

1. As soon as possible after sampling, take the sampler to a clean area. Remove sorbent capsule by pulling off the back cover. Properly dispose of the foam disk.
2. Place the capsule in its original pouch container. Fold down the top of the pouch twice and press the folds flat. Seal with a self-adhesive ID label.
3. Mail or take the capsule and at least one field blank to a qualified laboratory for analysis. The sorbent should be analyzed within 30 days of sampling.

For Cleaning

1. Remove the collar clip, and clean with soap or detergent and water.
2. Disassemble the sampler and place all parts (except foam disk, sorbent capsule and collar clip) in a container. Wash in a dilute solution of nitric acid (around 15%) in distilled water.
3. Rinse parts three times in separate rinses of distilled water.
4. Dry as quickly as possible.
5. Re-assemble sampler housing for storage, without the sorbent capsule or foam disk. See Figure 1.
6. Store in a clean area (where the sampler will not become contaminated with mercury) until ready to use again.

Note: *Always use a sorbent capsule within a few days of opening the pouch and placing it in the sampler; the sealing cap does not provide a hermetic seal.*

When fitting a replacement capsule, ensure that the two mesh disks are in place within the sampler housing. These disks must be kept in place at all times to ensure reproducible sampling rates under all environmental conditions.

Do not store any parts of the sampler in areas where they may become contaminated with mercury.

Make sure a pouch is available after the sampling period to store the exposed capsule.

Always clean the sampler housing before reusing to guard against accidental carry-over from previous sampling.

This mercury sampler only samples elemental mercury (Hg) in the vapor phase and does not sample organic mercury compounds or particulate matter.

Take precautions when sampling for mercuric chloride. It can collect on the face of the badge and interfere with sampling.

Interferences During Sampling

Ambient Temperature

The sampling rate will vary with ambient temperature changes which affect the diffusion rate. This effect is small but may be significant if sampling at unusually high or low temperatures. The diffusion coefficient D is a function of the absolute temperature T by the relation $D \propto T^{1.5}$. This factor is taken into account in the calculation used in the OSHA method (See page 4).

Wind Velocity

The sampling rate will remain substantially constant over a range of wind velocity from 25—750 ft/min. In very still air conditions (below 25 ft/min), the sampling rate will drop by up to 30%. If very high wind velocities (in excess of 750 ft/min) are expected, passive samplers should not be used.

Ambient Pressure Changes

The sampling rate varies with ambient pressure changes which affect the diffusion rate. The diffusion coefficient is inversely proportional to the ambient pressure. This factor is taken into account in the calculation used in the OSHA method.

Presence of Other Gases

The sampling of mercury on the sorbent has been shown to be unaffected by the presence of other gases, including chlorine. Note, however, that complex interactions in the atmosphere may reduce the total free elemental mercury present to be sampled.

Analysis

Preparation of Samples

Open the capsule and carefully pour the sorbent into a 50 ml volumetric flask. Add 5 ml of concentrated nitric acid followed by 5 ml concentrated hydrochloric acid. Allow to stand for approximately 30 minutes or until the sorbent is fully dissolved. Stir gently if necessary. Add approximately 15 ml of distilled water to bring total liquid quantity up to 25 ml.

Note: When Anasorb C300 is dissolved, a milky suspension results. This is an insoluble residue and must be removed by filtration or centrifugation before analysis.

Aliquots are taken from this solution and analyzed at 253.7 nm by flameless atomic absorption.

Always prepare a "blank" by dissolving a fresh, unexposed capsule of the same lot number as the test specimen. This "blank" value represents the background level of mercury in the sorbent and should be subtracted from all readings.

Mercury Desorption

The basic mechanism of desorption consists of adding an excess of stannous chloride to the aliquot of sample solution. This causes the mercury to be released as elemental mercury which is swept into the analyzer by an air or nitrogen stream.

Calibration
The complete analytical system can be calibrated by injecting aliquots from standard solutions (either from liquid or sorbent solution standards or both). It is recommended that three different concentrations be checked to insure linearity of the equipment over the likely range.

It is further recommended that standards and blank values be interspersed between samples to check for any variations in response. Take particular care to avoid buildup of mercury on the internal surfaces of the equipment; this will cause an increase in readings. A buildup of mercury can be detected by a gradual apparent increase in the blank values during use. If this occurs, run several aliquots of mercury-free solutions through the equipment until the analyzer indication drops to zero. Retest the "blank" solution as an additional precaution before proceeding.

Report all results as nanograms or micrograms of mercury on the capsule by direct comparison with the known standards. Relate the aliquot size to the total 25 ml of liquid solution.

Consult OSHA Method ID 140 for detailed analytical procedures.

Interpretation of Results
The lab result will indicate the total mass of mercury which was collected on the sorbent capsule in either nanograms (10^{-9} gram) or micrograms (10^{-6} gram). The airborne concentration of mercury is determined as follows:

1. Convert reported mass of mercury into micrograms (10^{-6} gram).
2. Convert sampling period into minutes.
3. Sample Volume (L) =
   Sampling Period x Sampling Rate x Temperature/Pressure
   (mins) (L/min) Correction Factor

   Where:
   Sampling rate = 0.020 L/min at 20 C and 760 torr
   Temperature/Pressure Correction Factor = $(T_1/T_2)^{1.5} \times (P_2/P_1)$
   T_1 = Sampling Site Temperature (K)
   T_2 = 293 K
   P_1 = Sampling Site Pressure (torr)
   P_2 = 760 torr
4. Mercury mg/m^3 = $\dfrac{\text{Mercury Mass } (\mu g) - \text{Mercury Blank } (\mu g)}{\text{Sample Volume (L)}}$

Note: *This is the calculation of mercury concentration as given in OSHA Method ID 140 (Revised June 1991), p. 16.*

Ordering Information

Sorbent Capsules (pk/10) ..... Cat. No. 520-02A

Reusable Capsule Holder ..... Cat. No. 520-03

Notice: This operating instruction may not address all safety concerns (if any) associated with this product and its use. The user is responsible for determining and following the appropriate safety and health practices and regulatory limitations (if any) before using this product. The information contained in this document should not be construed as legal advice, opinion, or as a final authority on legal or regulatory procedures.

Form #3758—Rev 0508

Publication 1176 Rev 0406

Surface Sampling Kits

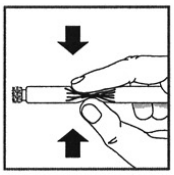
Colormetric Swabs

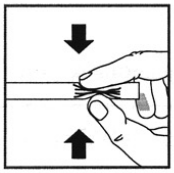
- **Simple to use**
  - Swab tip turns color to indicate the presence of the contaminant
- **Convenient**
  - Can be used almost anywhere
- **Fast**
  - Results in minutes
- **Inexpensive**
  - No instruments or analysis required
- **Easy to interpret**
  - Positive confirmation procedures included in each kit
- **Substance specific**
  - Each contaminant produces a different color

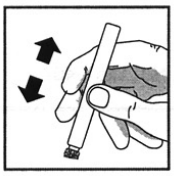
Surface Sampling Test Kits

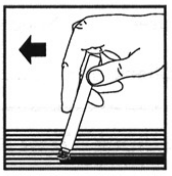
Each kit includes eight self-contained sampling swabs with all of the materials required for a rapid screening test to detect a specific contaminant on surfaces and in liquids. They are simple to use, easy to interpret, and provide results in minutes. Simply squeeze the swab to release the reagent, shake and squeeze gently until liquid appears on the tip of the swab, then wipe the surface area with the swab. Observe the color change which indicates the presence of the contaminant. Each is specific for the designated contaminant with no other materials reacting to give the same color. Since no instruments are needed, the swabs are convenient and can be used anywhere.

How To Use the Test Kits

1 

2 

3 

4 

1. Squeeze the swab to crush the front glass vial inside.
2. Squeeze the swab to crush the rear glass vial inside.
3. Shake the swab to mix the reagents.
4. While squeezing the swab, rub the surface to be tested for approximately 30 seconds. Within one minute, the swab will turn color if the contaminant is present.

For colorimetric determinations of lead on skin and surfaces, see Full Disclosure Wipes at www.skcinc.com.

SKC®

SKC Inc. 724-941-9701 SKC West 714-992-2780 SKC Gulf Coast 281-859-8050 SKC South 434-352-7149
www.skcinc.com

Surface Sampling Kits

For Lead, Mercury, Cadmium, Nickel, and Chromates

LeadCheck® Test Kit

- **Sodium rhodizinate based**
  - Meets specifications of NIOSH Method 7700 for lead
- **Detects lead on many surfaces**
  - Lead paint on any surface, ceramic glazes, dinnerware, crystal, food cans, solder, toys, dust
- **Lead-specific**
  - Rapidly detects lead or dust containing lead on any surface. Swab tip turns pink in the presence of lead.
- **Sensitive**
  - Detects 2 µg of lead on solid surfaces
- **Crossreactants**
  - High concentrations of tin turns swab tip purple
- **Interferences**
  - High concentrations of sulfate (found in most plasters) and chloride may interfere with lead detection

The FDA reports that the LeadCheck swabs were able to detect the presence or absence of lead on 96.6% of the surfaces sampled. The National Institute of Standards and Technology (NIST) found that the LeadCheck Swabs were able to detect lead in paint as well as or better than other testing methods.

LeadCheck, pk/8 ..... **Cat. No. 225-2404**

MercuryCheck® Test Kit

Specific ..... Detects mercury (Hg^{2+}) on any surface. The only test available for the instant detection of mercury ions (HG^{2+})

Sensitive ..... Detects 1 to 2 µg on solid surfaces
Detects 10 ppm in liquid

Crossreactants ..... Copper ions (Cu^{2+}) turn swab tip red-brown; silver ions (Ag^{+}) turn swab tip purple

Interferences ..... None known

MercuryCheck, pk/8 ..... **Cat. No. 225-2407**

CadmiumCheck™ Test Kit

Specific ..... Detects cadmium (Cd) on any surface

Sensitive ..... Detects 1 µg on solid surfaces
Detects 5 ppm in liquid

Crossreactants ..... High levels (> 10 µg) of nickel (Ni) turn swab tip peach; high levels of mercury or silver turn swab tip orange

Interferences ..... High levels of chromium (Cr^{3+}) can prevent color development

CadmiumCheck, pk/8 ..... **Cat. No. 225-2411**

NickelCheck™ Test Kit

Specific ..... Detects nickel (Ni) or dust containing nickel on any surface

Sensitive ..... Detects 1 µg on solid surfaces
Detects 10 ppm in liquid

Crossreactants ..... High levels of cobalt (Co^{2+}) turn swab tip brown; high levels of iron ($Fe^{2+,3+}$) turn swab tip green; copper ions (Cu^{2+}) turn swab tip brown; silver ions (Ag^{+}) turn swab tip green

Interferences ..... None known

NickelCheck, pk/8 ..... **Cat. No. 225-2412**

ChromateCheck™ Test Kit

Specific ..... Detects chromate (CrO_4) or dust containing chromate on any surface

Sensitive ..... Detects 3 µg on solid surfaces
Detects 20 to 30 ppm in liquid

Crossreactants ..... None known

Interferences ..... None known

ChromateCheck, pk/8 ..... **Cat. No. 225-2410**

Notice: This publication is intended for general information only and should not be used as a substitute for reviewing applicable government regulations, equipment operating instructions, or legal standards. The information contained in this document should not be construed as legal advice or opinion nor as a final authority on legal or regulatory procedures.

SKC®

SKC Inc. 724-941-9701 **SKC West** 714-992-2780 **SKC Gulf Coast** 281-859-8050 **SKC South** 434-352-7149
www.skcinc.com

A14 - INFORMATIONS SUR LE MATERIEL EMPLOYE POUR LA REALISATION DES ANALYSES DE LABORATOIRE (SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION ATOMIQUE ET FLUORESCENCE X)

CONDITIONS OPERATOIRES POUR L'ANALYSE DES ECHANTILLONS PRELEVES SUR LE SITE DE LA RESERVE DU MUSEE DE LA SCIENCE ET DE L'INDUSTRIE

Fluorescence X (Faculté des sciences et de technologie de l'Université nouvelle de lisbonne – département de conservation-restauration)

L'appareil employé est un spectromètre de marque ArtAX Pro équipé d'une ampoule au molybdène dotée d'un potentiel max. de 50 kV, d'une intensité max. de 0.6 mA et d'une puissance max. de 30 Watt. Le diamètre du rayon laser est d'environ 70 µm. Le détecteur équipant le spectromètre est un semi-conducteur en silicium possédant une résolution de 160 eV à 5.9 keV. L'équipement possède un bras articulé équipé d'une caméra vidéo et d'un laser à diode rouge permettant de focaliser sur la zone de l'échantillon à analyser. Le traitement des spectres obtenus est effectué à l'aide du programme ArtAX Control Software. Les conditions d'analyse pour les échantillons du musée de la science et de l'industrie ont été les suivantes : 40 kV, 300 µA, temps d'accumulation de 200s.

Spectroscopie d'absorption atomique (Faculté des sciences de l'Université de Porto – département de chimie)

La technique employée pour le prélèvement des échantillons d'air dans la réserve du musée de la science et de l'industrie correspond à l'adaptation, par M. Perreira (professeur de chimie analytique), d'une méthode (Method 29 – Détermination of Metals Emissions from Stationary Sources) développée par l'EPA. Cette dernière consiste à aspirer une certaine quantité d'air à l'aide d'une pompe électromagnétique de type SKC® et à la faire circuler dans deux flacons comportant les solutions aqueuses suivantes : flacon 1 – acide nitrique (5%) et peroxyde d'hydrogène (10%) ; flacon 2 – permanganate de potassium (4%) et acide sulfurique (10%). Le temps de pompage est de 1428 minutes et correspond à un volume de 988.62 litres.

Les échantillons d'air sont analysés par spectroscopie d'absorption atomique en vapeur froide. Le spectromètre est calibré avec diverses solutions (concentrations connues) de mercure Hg^{2+}. La concentration de mercure est ensuite calculée à partir de la courbe de calibration et compte tenu des dilutions utilisées ainsi que la conversion des unités. Les échantillons de poussière sont analysés à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique PerkinElmer Aanalyst 500, équipé d'une lampe à mercure, couplé à un système de génération d'hydrure MHS-15 Mercury/Hydride System (voir chap. 2.6.2.2).

Microscopie optique (Haute école d'arts appliqués ARC – section conservation – restauration)

Le microscope optique employé est le modèle Axioskop2 de chez Zeiss (grossissement de 50 à 500x). Les éclairages internes à l'appareillage n'ont pas été employés, car de meilleurs résultats sont obtenus avec un éclairage rasant de l'échantillon à l'aide d'une source lumineuse à fibre optique.

AAnalyst 200 AA Spectrometer

Control and data system

User interface	Complete control of the AAnalyst™ 200 through an innovative touch-screen interface. Flexible software for lamp setup, flame control, parameter selection and sample analysis. The tools menu provides access to recommended conditions, method storage and recall, data transfer and service diagnostics screens. The AAnalyst 200 supports multiple languages, including Spanish, English, French, Russian, Japanese, German, Italian and Chinese.
Display	Full-color 10.4″ LCD touch screen. VGA resolution (640 x 480 pixels). Coated for maximum durability and lifetime.
Data handling	The parameters page is used for setting up the analysis. Users can select up to eight calibration standards or a reslope standard and choose from seven different calibration algorithms. Integration times are operator-selectable from 0.1 to 99.9 sec. Print choices include method, replicates and calibration curve. Signal measurement modes include time-averaged integration, manual continuous graphics and peak-height measurement. An optional footswitch to trigger a read is also available.
Sample analysis	The sample-analysis page is used for manual or automated analysis. All results are displayed on the screen. Separate buttons for blank, standards and samples allow for easy analysis. Sample-identification numbers can be added. The calibration curve can be displayed and printed with correlation coefficient, slope and intercept. Peaks can be displayed and printed when using the MHS-15 accessory.
Accessories	Automated analysis can be performed with the AS-90*plus* or AS-93*plus* autosampler. The MHS-15 can be used for the determination of hydride-forming elements and mercury.

Hardware

System	True double-beam echelle optical system. Front surfaced, reflecting optics with protective coating. Deuterium background corrector and built-in EDL power supply available on some models.
Optical system	Echelle monochromator. Focal length: 300 mm. Grating: 36 x 185 mm area, 79 lines/mm, blaze angle 76°. Fused quartz prism: 95 x 40 mm, 60°. Wavelength range: 189-900 nm. Spectral bandpass: 0.15 nm at 200 nm. The photometer optics are covered to protect against dust and corrosive vapors. For maximum protection, the optical system can be purged with an inert gas.
Detector	High efficiency, segmented solid-state detector.
Light sources	Hollow cathode lamps (HCLs) and electrodeless discharge lamps (EDLs). EDLs provide much higher light output and longer lifetime when compared to conventional HCLs. Lamp elements and recommended operating currents and slit selection are automatically recognized and set when using PerkinElmer® Lumina™ series AA lamps. Lamp alignment is completely automatic in models with a four-lamp turret.

Electronics

Processor	Internal 300 MHz GX1 with 64 Mbytes of DRAM and 128 Mbytes of Flash program memory on a PC104 interface-style printed circuit board. Includes real-time clock.
Graphics	32-bit controller on PC104 board.
Ports	RS232 C, 9-pin, parallel printer and 10BaseT Ethernet on some models.
E-box	All electronics are located in a single user-replaceable module. The operator can just slide the module out from the front of the instrument and replace it with a new one. Instrument operators can replace most parts quickly and easily without a service visit.

Gas controls and burner system

Flame gas	Fully automated gas box with computer-controlled oxidant selection with automatic gas sequencing, oxidant and fuel monitoring and control.
Control	Touch-screen actuated ignition with air/acetylene. Acetylene flow is automatically adjusted when switching to or from nitrous-oxide/acetylene operation.
Flame safety features	Fully interlocked operation prevents ignition if the proper burner head, the nebulizer, end cap or burner drain system is not correctly installed, the level of the liquid in the drain vessel is incorrect, or gas pressures are too low. Interlocks will automatically shut down the gasses if a flame is not detected. The flame is automatically and safely extinguished in the event of a power failure or when the emergency flame off button is used.
Burner system	An inert polymer mixing chamber provides superior analysis of corrosive and high solid matrices. The spray chamber is manufactured from a high strength composite, eliminating the need for pressure relief devices. The high-precision inert nebulizer maximizes stability and sensitivity. A 10-cm single-slot solid titanium burner head for air/acetylene operation is included. Optional burner heads include: 5-cm nitrous-oxide/acetylene, 10-cm 3-slot air/acetylene and 5-cm single-slot air/acetylene.
Sample area	25 cm wide x 25 cm deep sample compartment for easy access to burner components.

System specifications

Dimensions	70 cm wide x 65 cm deep (0.46 m^2) x 65 cm high
Weight	49 kg
Power requirements	100-230 VAC (±10%), 50/60 Hz (±1%), 300 VA (maximum)
Technical	Classified as a laboratory instrument. Complies with the applicable European Union directives and standards for safety and electromagnetic compatibility for CE Marking, the safety requirements for Canada and the United States for CSA/NRTL certification and the FCC requirements for radio-frequency emissions. The instrument was developed and produced in compliance with ISO 9001.
Environmental	Dust free, free of vibrations, ambient temperatures: +15 °C to +35 °C with a change rate of a maximum 3 °C per hour. Relative humidity: 20% to 80% non-condensing.

PerkinElmer Life and Analytical Sciences
710 Bridgeport Avenue
Shelton, CT 06484-4794 USA
Phone: (800) 762-4000 or
(+1) 203-925-4602
www.perkinelmer.com

PerkinElmer®
precisely.

For a complete listing of our global offices, visit www.perkinelmer.com/lasoffices

©2005 PerkinElmer, Inc. All rights reserved. The PerkinElmer logo and design are registered trademarks of PerkinElmer, Inc. AAnalyst and Lumina are trademarks and PerkinElmer is a registered trademark of PerkinElmer, Inc. or its subsidiaries, in the United States and other countries. All other trademarks not owned by PerkinElmer, Inc. or its subsidiaries that are depicted herein are the property of their respective owners. PerkinElmer reserves the right to change this document at any time without notice and disclaims liability for editorial, pictorial or typographical errors.

006602C_01 KG070503 Printed in USA

MHS-15 Mercury/Hydride System

Minimum investment and low operating costs

The MHS-15 Mercury/Hydride System is a manual accessory for high-sensitivity determination of mercury and hydride-forming elements, such as As, Se, Sb, Te, Bi and Sn, by flame atomic absorption (AA) spectroscopy. Mercury/hydride atomic absorption is the preferred technique for trace determination of mercury and the metallic hydride-forming elements, because it offers the best possible detection limits, down to the ng range, while minimizing capital investment and operating costs. The technique is simple, easy-to-handle, and reliable and has been proven in tens of thousands of laboratories worldwide.

Simple operation

The MHS-15 system includes a reaction assembly and a quartz-cell assembly. The analyzer is free-standing and is placed adjacent to the AA spectrometer sample compartment. It includes a reaction flask, a reservoir for the reducing agent and all pneumatic components for carrier transportation of the metallic vapors to the quartz cell.

The cell mounts on a standard 10-cm PerkinElmer® burner head, permitting the cell to be heated in the spectrometer flame. The quartz cell is positioned in the light beam of the spectrometer and alignment is provided by the instrument's burner adjustment controls. Its

Key Benefits

- Minimum investment
- Low operating costs
- Simple operation
- Works with all PerkinElmer atomic absorption spectrometers

www.perkinelmer.com

PerkinElmer®
precisely.

quartz cell can be easily tilted out of the flame using a swivel mount.

Due to the reaction chemistry in the mercury/hydride process, the analyte is completely separated from its matrix during analysis, eliminating interferences.

Operating procedure

During analysis, the sample containing the analyte in ionic form is placed in the reaction flask. The flask is then installed into the analyzer assembly.

By manually actuating a pneumatic valve, an argon stream transports the reducing agent ($NaBH_4$) from a reservoir into the sample. The special conical form of the immersion tube and reaction flask provides excellent mixing of the sample and $NaBH_4$, guaranteeing spontaneous reaction. No stirring device is required for this procedure.

Hydrogen, liberated during the reaction, reduces the metal ions to gaseous hydrides. In the case of mercury determination, $NaBH_4$ reduces mercury into its metallic state. Excess hydrogen and the argon carrier gas transport the hydride (or metallic mercury) vapor into the quartz cell where the absorption of the metal is measured. During mercury determination, the cell remains at ambient temperatures. Mercury determination can also be performed using stannous chloride ($SnCl_2$) as the reducing agent. For the determination of hydride-forming elements, the quartz cell is heated by an air/acetylene flame to thermally decompose the metal hydrides.

Detection limits using the MHS-15 with the AAnalyst™ 700

(EDL lamps were used for all elements)

Element	Absolute (ng) (in 10-mL volume)	Relative (µg/L) (in 50-mL volume)
As	1.0	0.02
Se	1.0	0.02
Bi	2.0	0.10
Sb	5.0	0.10
Te	2.0	0.05
Hg	1.0	0.02

Technical data

Absorption cell	Quartz cell, 165 mm long, 12 mm diameter
Cell heating	Up to approx. 1000 °C with air/acetylene flame
Reaction flask	Polypropylene flask with special, conically formed inner side. Connection to the analyzer assembly with special joint with O-ring gasket.
Sample volume	Max. 50-mL volume
Reducing agent	$NaBH_4$ or $SnCl_2$
Inert gas supply	Argon, inlet pressure 2.5-3.5 bar (36-51 psig) approx. consumption 1.1 L/min
Power supply	No electrical supply is required.
Dimensions	70 mm wide x 160 mm deep x 375 mm high
Weight	Approximately 4.3 kg

Ordering information

Part Number	Description
B3140760	**MHS-15 Mercury/Hydride System** – Manually operated system for the high-sensitivity determination of Hg and metallic hydride-forming elements such as As, Bi, Sb, Sn, Se and Te. Includes analyzer with sample flask and reagent reservoir. Manual selection of $NaBH_4$ or $SnCl_2$ reductant solution. Also includes a quartz cell, which may be heated with an air/acetylene flame. No electrical connections are required. For use with all PerkinElmer flame AA instruments.
B3000350	**Cell holder** – To mount an MHS-15 quartz cell on the burner system.
B0094321	**Reaction flask for MHS-15** – Specially formed polypropylene reaction vessel with cover.
B0087354	**Reductant reservoir for MHS-15**
B0094415	**Quartz cell for MHS-15** – Complete with graphite cooling rings and silicone rubber sleeves.

PerkinElmer Life and Analytical Sciences
710 Bridgeport Avenue
Shelton, CT 06484-4794 USA
Phone: (800) 762-4000 or
(+1) 203-925-4602
www.perkinelmer.com

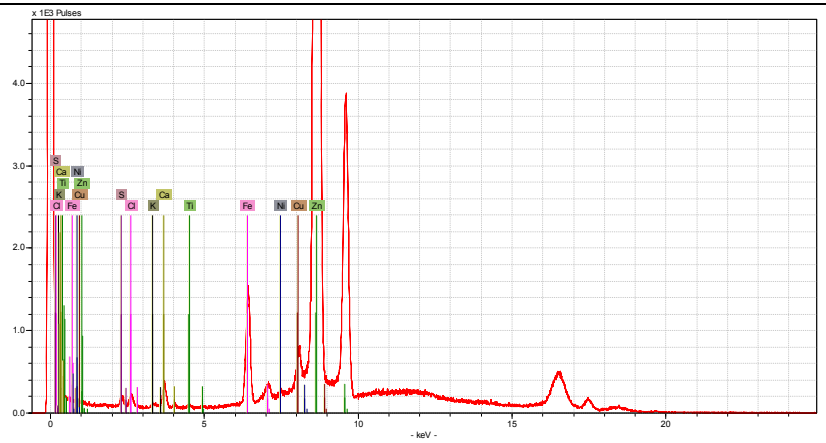
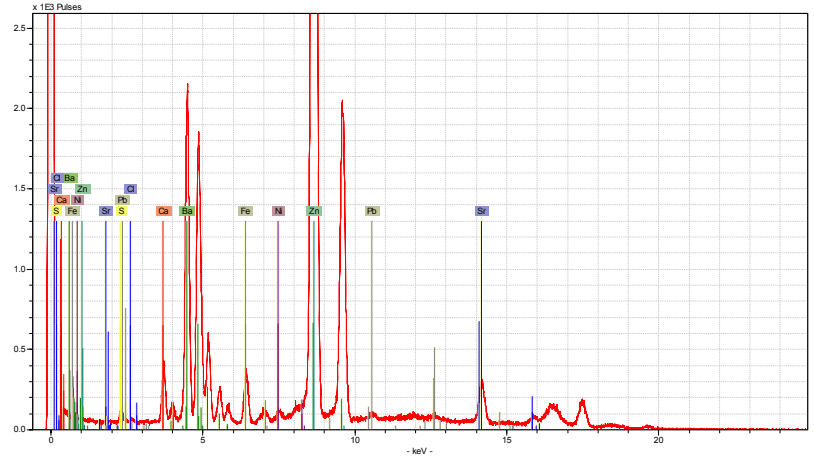
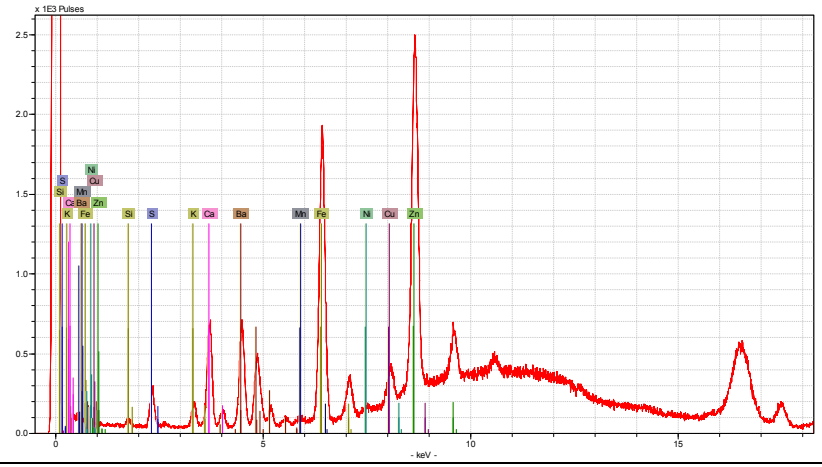
PerkinElmer®
precisely.

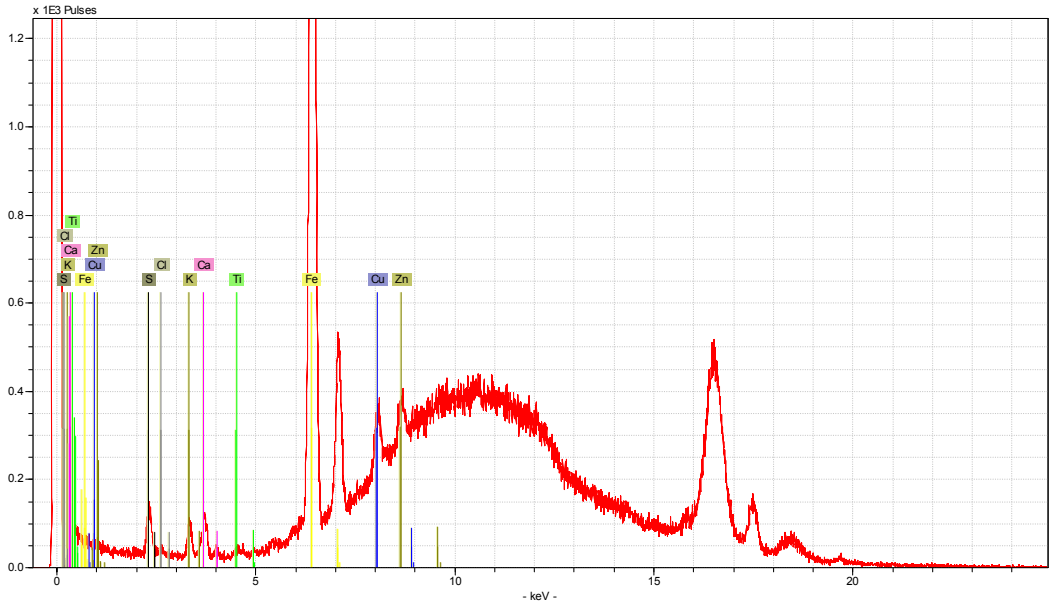
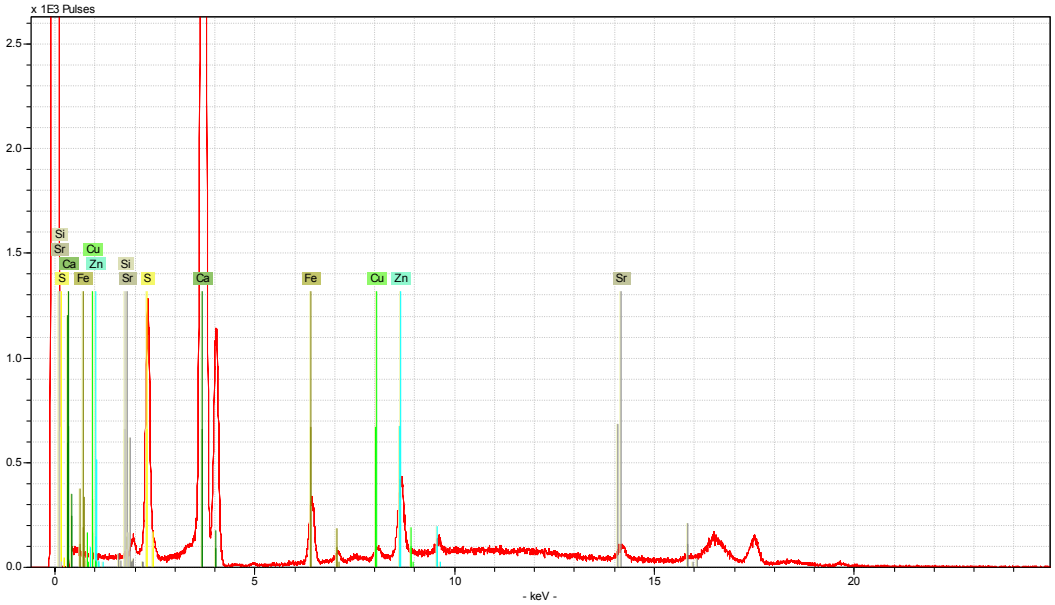
For a complete listing of our global offices, visit www.perkinelmer.com/lasoffices

©2004 PerkinElmer, Inc. All rights reserved. The PerkinElmer logo and design are registered trademarks of PerkinElmer, Inc. AAnalyst is a trademark and PerkinElmer is a registered trademark of PerkinElmer, Inc. or its subsidiaries, in the United States and other countries. All other trademarks not owned by PerkinElmer, Inc. or its subsidiaries that are depicted herein are the property of their respective owners. PerkinElmer reserves the right to change this document at any time without notice and disclaims liability for editorial, pictorial or typographical errors.

006385C_01 ELEC110400 Printed in USA

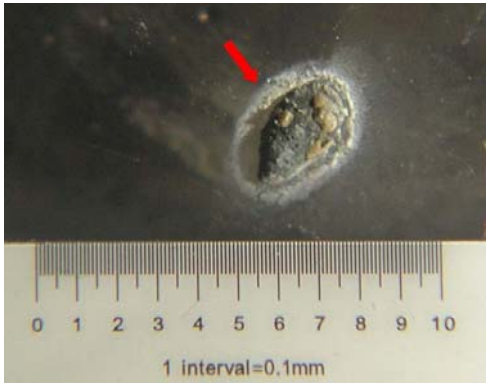
A15 - SPECTRES RESULTANT DES ANALYSES DE FLUORESCENCE X EFFECTUEES SUR LES PRODUITS D'ALTERATIONS DE NATURE BLANCHE PRELEVES SUR LES AMPOULES DES REDRESSEURS

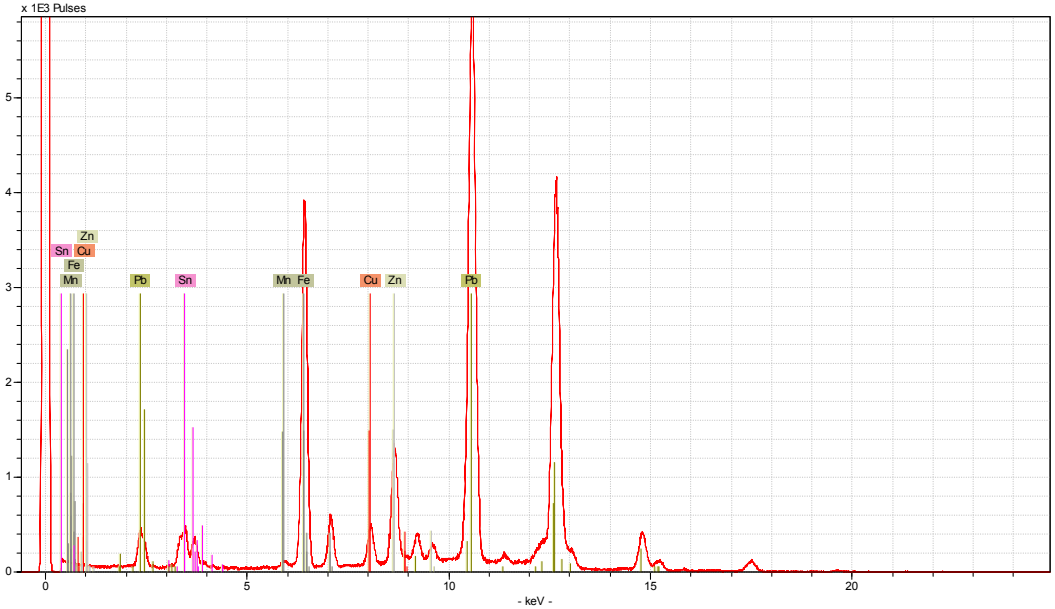
3 Produit de corrosion de nature blanchâtre, parfois verdâtre, présent sur les connexions métalliques des cathodes des ampoules		
4 Produit blanc de nature poudreuse présent sur les fibres d'amiante constituant l'isolation des pattes de suspension des ampoules,		
5 Dépôt blanc fixé à la surface du verre, sous forme de petites particules (en dessous du mm) réunies en forme de taches de plus au moins grande dimension.		

6 Peinture d'aspect métallique recouvrant la surface du verre au niveau des bras anodiques.		
7 Produit blanc et compact, de nature friable, présent sous certaines connexions anodiques, entre le chapeau métallique et le verre.		

8

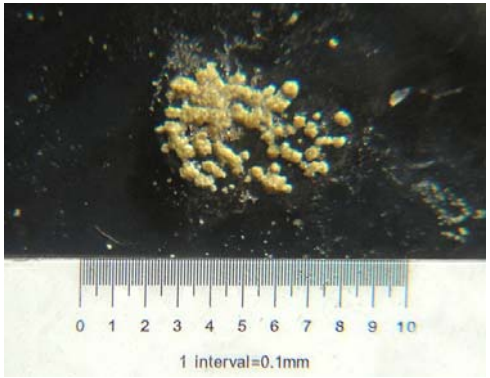
Particule grise de quelques mm de diamètre, dure comportant un aspect métallique sous sa base, fortement fixée à la surface du verre.

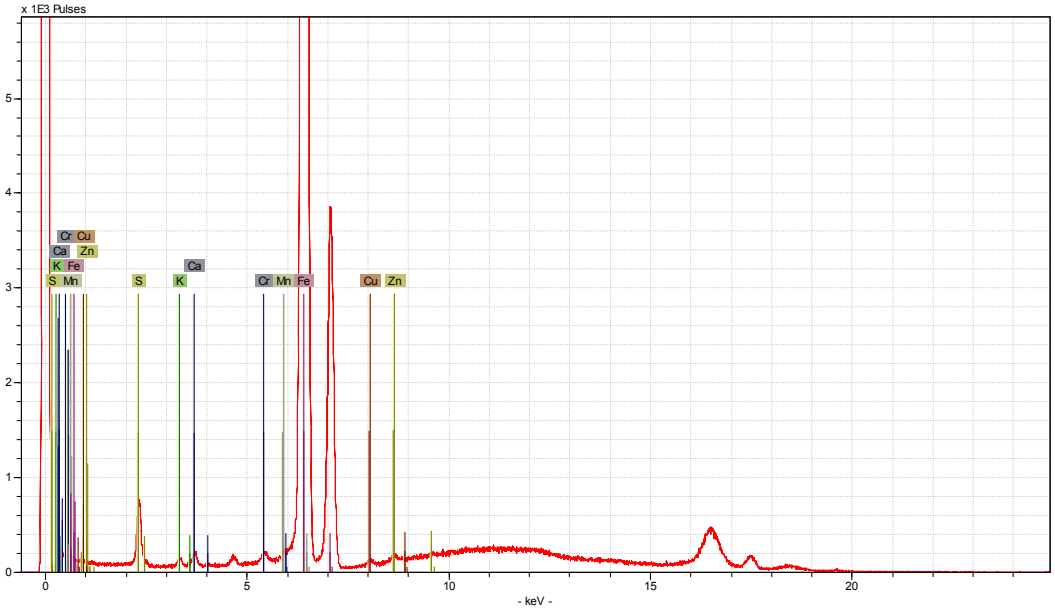




9

Poudre jaune agglomérée, déposée à la surface du verre et faiblement fixée à cette dernière.





A16 - PROTOCOLE D'INTERVENTION POUR L'EXTRACTION DU MERCURE DE L'AMPOULE CASSEE, DU MUSEE DE LA SCIENCE ET DE L'INDUSTRIE

PROTOCOLE D'INTERVENTION : EXTRACTION DU MERCURE DE L'AMPOULE HACKBRIDGE & HEWITTIC

Description : Ampoule en verre d'une hauteur de 130 cm et d'un diamètre maximum de 50 cm. L'ampoule pèse approximativement 30 kg et est actuellement stockée à l'envers, le mercure se trouvant au fond du dôme (fig.2). Un des bras en verre des anodes est cassé (fig.2) et constitue le seul accès possible (sans porter préjudice à l'objet) pour l'extraction du mercure. L'ampoule se trouve dans une boîte en bois munie d'un couvercle (fig.1).

Fig.1 – Boîte fermée contenant l'ampoule

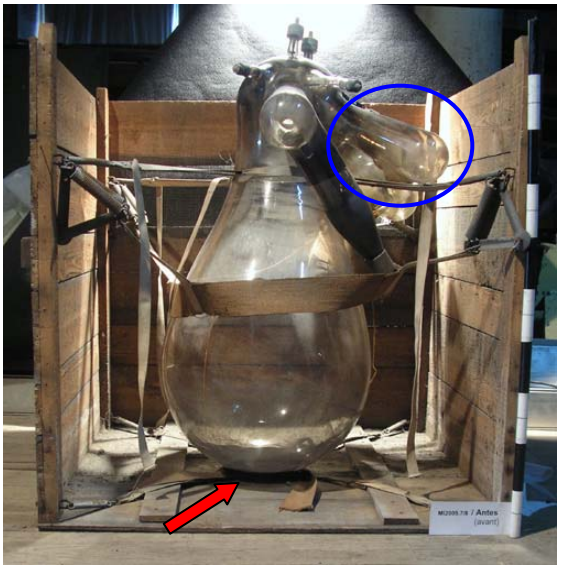


Fig.2 – Ampoule attachée dans la boîte ouverte

But de l'intervention: extraction du mercure de l'ampoule. L'ampoule étant cassée, le mercure se trouve directement exposé à l'environnement, ce qui est contraire aux directives émises par les instances compétentes en matière de stockage de ce matériau, qui recommandent un récipient hermétiquement fermé. Le but de cette intervention est donc de retirer le mercure, afin de le stocker dans un récipient adéquat et de préserver l'ampoule dans les meilleurs conditions. L'opération ne pouvant pas être effectuée dans cette position (hauteur trop importante entre l'ouverture et le bain de mercure), l'ampoule doit être repositionnée.

Intervention : l'intervention se divise en plusieurs étapes permettant de procéder à l'extraction du mercure avec toutes les précautions nécessaires pour l'objet et pour le personnel concerné.

Etape 1 :

Retirer le couvercle en dévissant les quatre vis qui le fixe à la boîte : deux à gauche et deux à droite (fig.1). Ouvrir la face avant de la boîte en retirant les six planches à l'aide d'un gros tournevis et d'un pied de biche (avec précaution pour ne pas abîmer les clous et les planches). Cette opération permet de manipuler l'ampoule sans devoir la soulever pour la sortir de la boîte.

Etape 2 :

Nettoyer la surface de l'ampoule, afin de pouvoir procéder à l'intervention avec la plus grande précaution possible (manipulation, visibilité). L'utilisation d'un aspirateur permet d'éliminer les dépôts important de poussière. La sortie d'air de l'appareil est connectée à un tuyau dont l'autre extrémité est placée à l'extérieur du bâtiment (fenêtre). Ceci permet d'évacuer l'air pouvant être contaminé par le mercure à l'extérieur du bâtiment. L'ampoule est ensuite nettoyée à l'aide d'un mélange d'éthanol et d'eau déionisée (1:1), afin d'éliminer les dépôts les plus persistant.

Etape 3 :

Modifier la position de l'ampoule, afin de permettre l'extraction du mercure par le bras en verre cassé. Les étapes pour le positionnement de l'ampoule sont représentées sur le schéma de la figure 3 : en bleu, la boîte avec la face ouverte contre vous ; en verre, l'ampoule ; en noir, le mercure et en jaune, le bras en verre cassé. La première opération consiste a faire pivoter l'ampoule d'un quart de tour, afin que les trois bras en verre se trouvent du côté opposé à la face ouverte de la boîte. La deuxième étape consiste à coucher l'ampoule en la basculant vers l'avant (du côté de l'ouverture de la boîte) et à déposer la partie supérieur (petit diamètre) sur une mousse ou un coussin, comme représenté sur la figure 3, dernière illustration. Le bras cassé, représenté en jaune, est maintenant positionné contre le haut et la distance entre ce dernier et le bain de mercure est fortement réduite.

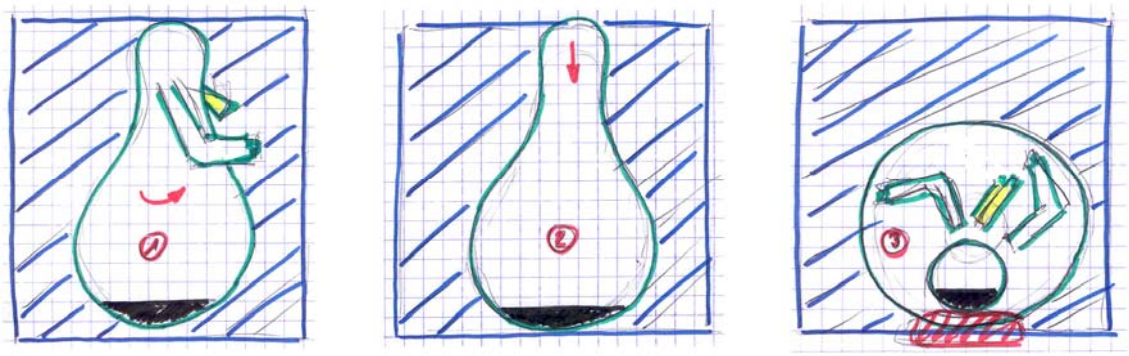


Fig.3 – Positionnement de l'ampoule pour l'extraction

Etape 4 :

Retirer le mercure par l'ouverture (bras cassé) à l'aide d'une pipette (30 – 40 cm de longueur) munie d'une pompe manuelle. Selon l'efficacité de cette technique, les résidus de mercure qui ne sont pas atteignable devront être retiré en manipulant l'ampoule (deux-trois personnes) de façon à faire couler le matériau dans le bras en verre cassé et à le faire sortir par l'ouverture. Le mercure retiré est immédiatement stocké dans des bouteilles en verre type Pyrex® revêtus d'une gaine plastique ou métallique et hermétiquement fermées.

Remarque :

Toute personne participant à l'intervention sera équipée d'habits de protection (tablier, blouse, salopette), de gants, de lunettes de protection ainsi que d'un masque de protection respiratoire muni d'un filtre approprié contre les vapeurs de mercure (3M® 6096 HgP3). Aucune personne non équipée ne doit être présente sur le lieu de travail. Une fois l'opération terminée, les gants doivent être enfermés dans un sac plastique fermé et éliminés aux ordures ménagères.

A17 - DESCRIPTION D'UNE REACTION CHIMIQUE SURVENUE LORS DU RAMASSAGE DES POUSSIERES CONTAMINEES DANS LE FOND DE LA BOITE EN BOIS COMPORTANT L'AMPOULE CASSEE

REACTION ALUMINIUM-MERCURE

Le document suivant décrit une réaction qui a eu lieu durant le nettoyage des poussières fortement contaminées par le mercure présentes au fond de la caisse en bois contenant l'ampoule cassée. Afin d'éliminer la partie la plus importante des poussières sans avoir recours à un aspirateur (création de vapeurs de mercure et contamination de l'appareil), il a été employé deux plaques d'aluminium d'une épaisseur de 1,5 mm, utilisées comme spatules. La poussière a été récoltée en raclant légèrement le fond de la boîte en bois et en la récoltant à l'aide des deux « spatules » (fig.1). Après avoir éliminé la plus grande partie des poussières, des résidus de mercure sont encore visibles au fond de la boîte (fig.2).

Fig.1 – Ramassage des poussières

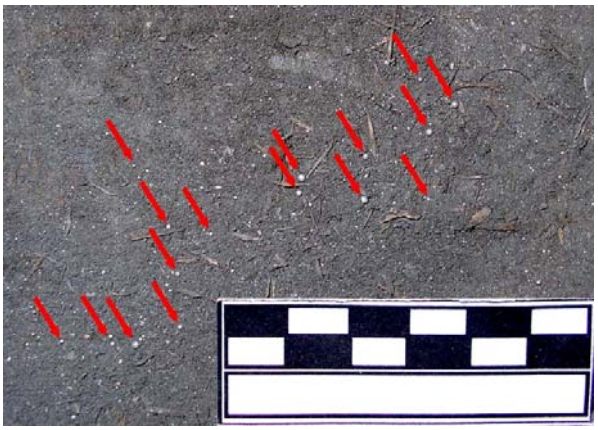


Fig.2 – Résidus de mercure après ramassage des poussières

Une fois l'opération terminée, les plaques d'aluminium ont été déposées sur un établi et aucune autre opération n'a été entreprise. Les images suivantes illustrent la réaction ayant eu lieu sur la tranche d'une des plaques d'aluminium, en fonction du temps écoulé :

Fig.3 – Tranche de la plaque d'aluminium utilisée pour racler le fond de la boîte : **a** – après 15 min. / **b** – après 180 min.

Sachant que le mercure peut s'amalgamer facilement à l'aluminium, la première hypothèse est une réaction entre la plaque d'aluminium et le mercure présent au fond de la boîte en bois, réaction qui a été encouragée par le frottement.

Après une recherche sur Internet, le phénomène a pu être identifié comme étant une réaction entre le mercure et l'aluminium, dont le produit résultant est de l'alumine. Voici l'explication copiée de la publication de Jean-Louis Vignes et *al.*[519] :

L'oxydation de l'aluminium en présence de mercure, par l'air atmosphérique à la température ambiante, se traduit par la croissance de fibres d'alumine hydratées sur la surface de l'aluminium amalgamé. Leur composition correspond à la formule Al_2O_3, $4H_2O$, leur structure est amorphe et leur diamètre de quelques nanomètres (fig.4).

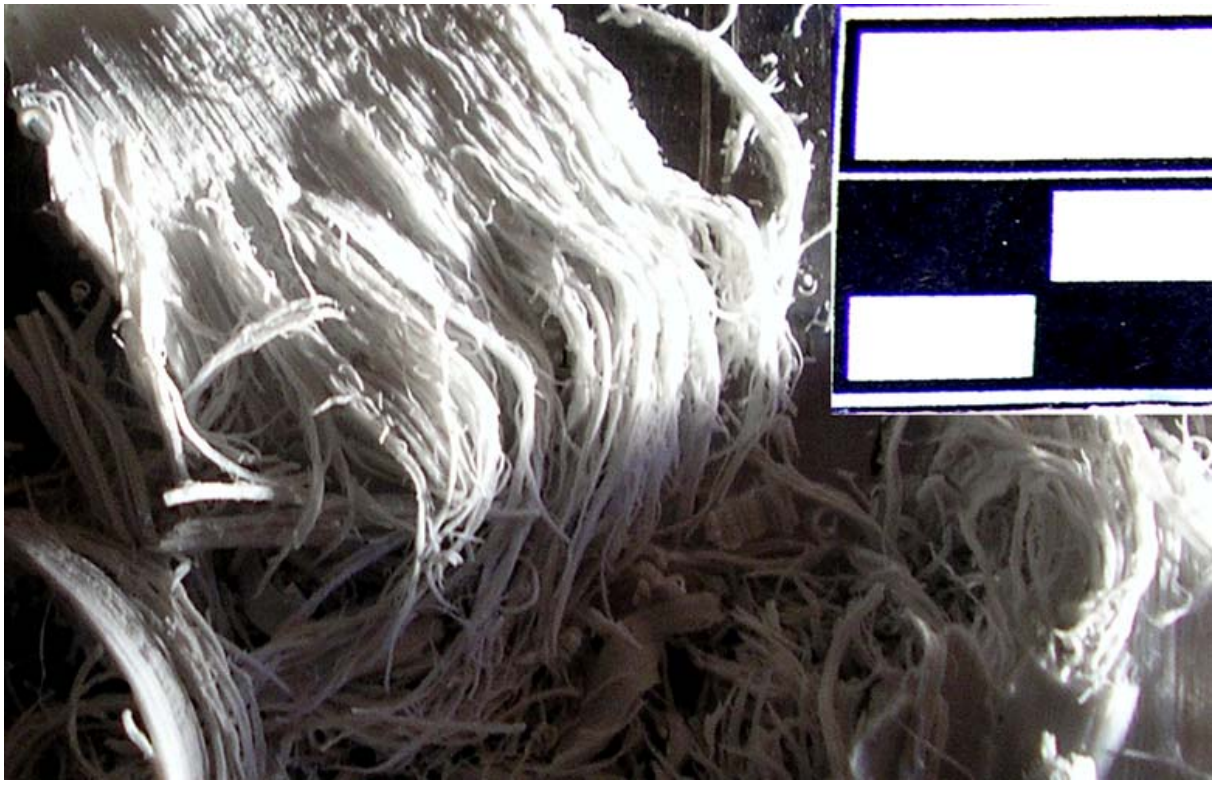


Fig.4 – Structure des fibres sur la plaque d'aluminium employée pour l'élimination des poussières contaminées par le mercure.

[519] VIGNES, 2002

A18 - PANNEAU D'AVERTISSEMENT REALISE POUR LES REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE DU MUSEE DE LA SCIENCE ET DE L'INDUSTRIE

PRESENÇA DE MERCÚRIO: TÓXICO

ÂMPOLA DE VIDRO FRÁGIL

- RISCO DE IMPLOSAO DAS ÂMPOLAS -

MANTER EM POSIÇAO VERTICAL

EVITAR MOVIMENTOS BRUSCOS OU CHOQUES

EVITAR DE FAZER PRESSAO NOS BRAÇOS DE VIDRO

EVITAR O CONTACTO DE OBJECTOS DUROS COM AS AMPOLAS DE VIDRO

EM CASO DE ACIDENTE : EVACUAR A AREA

Consultar a ficha de segurança dos aparelhos para mais informações

A19 - DOCUMENTATION, COMPORTANT LES RECOMMANDATIONS POUR L'ENSEMBLE DES REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE, PREPAREE POUR LA BASE DE DONEES DU MUSEE DE LA SCIENCE ET DE L'INDUSTRIE

FICHA DE SEGURANCA **MUSEU DA INDUSTRIA**

DATA : 15. 06. 2006 AUTOR : Antonin TARCHINI

DESIGNAÇÃO : conjunto de rectificadores de vapor de mercúrio.

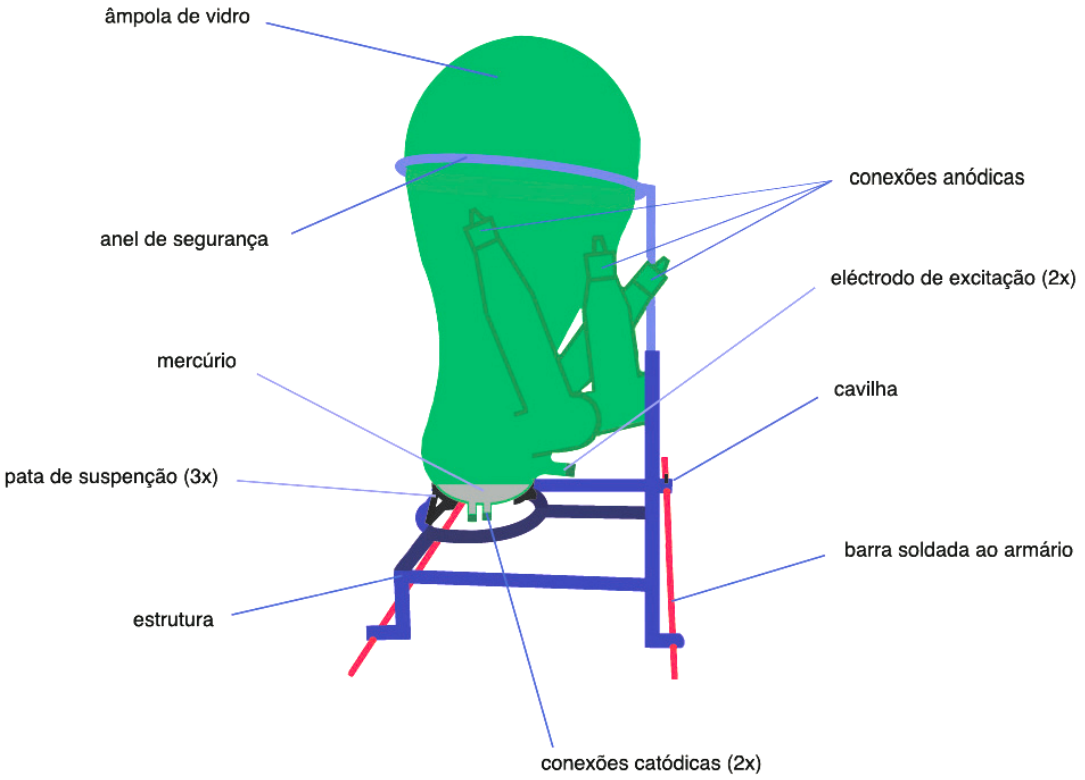
N° DE INVENTARIO : MI2005.7/11 ; MI2005.7/10 ; MI2005.7/9 ; MI2005.7/8.

LOCAL DE ARMAZENAMENTO : reserva do Museu da Indústria – rés-de-chão, ala nascente.

CAUSA PRINCIPAL DO PERIGO : mercúrio : ~ 4200 ml (56.8 Kg).

DESCRIÇÃO

O conjunto de rectificadores de vapor de mercúrio é constituido por tres armários, identificados pelos numeros 1 (MI2005.7/11), 2 (MI2005.7/10) e 3 (MI2005.7/9) contendo cada uma duas âmpolas de vidro indentificadas pelas letras A e B. A âmpola A do rectificador n°1 encontra-se guardada numa caixa original de transporte em madeira (MI2005.7/8) fechada por quatro parafusos. Os armários encontram-se fechados, mas não na sua totalidade, por placas e grelhas de aço emparafusados. Cada armário possui dois acessos laterais constituidos por portas em aço trancadas por um punho rotativo. As âmpolas são constituidas de vidro tipo PYREX e cada uma delas possui três conecções anódicas (extremidade dos braços), duas conecções cathódicas (base da âmpola), dois eléctrodos de excitação e um eléctrodo de arranque. Estes elementos estão ligados aos paineis eléctricos das estruturas dos armários por meio de cabos de metal (cobre). As âmpolas de vidro contêm um vacuo e cada uma delas possui uma quantidade de mercúrio equivalente a aproximadamente 700 ml. Cada âmpola está colocada numa estrutura em aço pintada de negro constituida por tres patas de supensão que sustentem a base e o peso da âmpola e um anel de segurança (parte superior) que permite manter a âmpola direita. A estrutura reposa sobre duas barras metálicas soldadas ao armário e é mantida em posição por uma cavilha.



IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO (MERCURIO)

O mercúrio é um metal pesado que se encontra na fase liquida à temperatura ambiental (ponto de fusão : -38,87 °C) e cujo uma das suas principais caracteristicas é a sua grande densidade (13.534 g/cm^3 à 25°C) e a sua faculdade de se évaporar à temperatura ambiental (aumento da evaporação com o aumento da temperatura). Considerado pela lei como substançia tóxica, o mercúrio é sujeito à uma serie de legislações (armazenamento, manipulação, transporte, ambiente, etc.) à nivel national (Direcção-Geral das Autarquias Locais (DGAL), Instituto do Ambiente (IA), Portal de Saúde Pública) e international (EUR-Lex, European Agency for safety and Health at work). O mercúrio é esentialmente perigoso por inalação e em menor escala por absorção cutanea e ingestão. Uma das suas principais caracteristicas tóxicas é ligada aos seus efeitos cumulativos que lhes dà a faculdade de se acumular no corpo humano. Para mais informações sobre a tóxicidade do mercúrio, consultar o boletim técnico desta substancia em anexo. Em caso de deramo, o mercúrio é um material dificil de recolher (separa-se em bolinhas microscopicas) que pode tornar a descontaminação complicada e muito honerosa.

O mercúrio é icompativel com a maioria dos metais comuns (aluminio, chumbo, zinco, estanho, cobre, oro, prata) e pode produzir reações extremamente violentas na presença de amônia, halogênios, bromo, agentes de oxidação fortes, compostos de acetileno, óxido de etileno.

IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO (RECTIFICADORES)

Um dos principais riscos está ligado à quantidade importante de mercúrio presente – geralmente um deramo superior a 500 gramas que é considerado como muito importante, deve ser repertoriado junto a instância competente e necessita a intervenção de uma empresa especialisada para decontaminação. Cada âmpola contem uma quantidade 21 vezes superior a esse valor. O mercúrio ocupa uma pequena porção da area das âmpolas, o resto encontra-se saturado em vapores de mercúrio que tambem seriam libertados en caso de ruptura das âmpolas. A fragilidade do material vidro, constituindo as âmpolas, é um risco importante ligado a este conjunto de apparelhos. A presença de vacuo no interior das âmpolas provoca um constrangimento mecanico constante (pressão atmosferica) que fragiliza ainda mais estes elementos que são sujeitos à implosão em caso de choque violento. O mercúrio da âmpola armazenada na caixa de madeira sendo retirado, esta jà não representa um risco importante de contaminação do ar. No entanto, os materiais constituindo este elemento devem ser considerados como contaminados e o textil e a madeira como potenciais libertadores de vapor de mercúrio.

De uma maneira geral, o estado de conservação dos materiais dos rectificadores ainda permitem uma preservação segura do mercúrio. No entanto, estes objectos tendo no minimo 50 anos, eles devem ser considerados como fragilisados pelo tempo (periodo de funcionamento e degradações environementais). A âmpola B do rectificador N°2 apresenta uma fissura de 5 cm de cumprimento à nivel da soldadura do braço de vidro direito. Esta degradação não parece ser responsavel pela libertação de vapores, mas é responsavel de uma fragilisação deste elemento, sempre considerado como sensivel. O anel de segurança da âmpola B do rectificador N°1 està solto e a âmpola deslocou-se de alguns cm (facto visivel ao nivel da pata de sustenção). O anel de segurança da âmpola B do rectificador N°2 presenta a mesma problemática, mas em menor importancia. Estas alterações favorecem a instabilidade das âmpolas. Os fenomenos de corrosão observados nos elementos metálicos (conecções eléctricas, armatura, armário) favorecem, a longo prazo, a fragilidade do conjunto da aparelhagem, e aumentam o risco de accidente ligado à presença de mercúrio (folgas, ruptura das âmpolas). As armaturas em aço das âmpolas são os elementos mais atingidos por este typo de degradação e constituem uma das partes mais importantes para a segurança das âmpolas. As patas de sustenção das bases das âmpolas presentam o estado de degradação o mais avançado. Estas partes estão directamente expostas a tenções mecánicas criadas pelo peso das âmpolas e poderiam jà não preencher o papel de suporte em caso de uma dergradação avançada do metal.

RECOMENDAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PREVENTIVA

Geral : todo o pessoal trabalhando no museu e especialmente as pessoas tendo acesso à reserva devem tomar conhecimento da existencia desta aparelhagem e dos perigos ligados a esta ultima (este documento pode servir de meio de informação). O acesso deve ser proibido a todas as pessoas estrangeiras ao museu (visitantes) e pessoas não informadas.

Condições ambientais : o metal feroso (aço) sendo o constituinte das prinicipais partes da aparelhagem e um material sensivel a degradações atmosfericas (comparado ao vidro de typo PYREX), as condições ambientais devem ser adaptadas a este ultimo. As condições recomendadas para a conservação de metais ferrosos corespondem a uma humidade relativa maxima de 30 % e uma temperatura de 18 °C. E importante évitar variações importantes de humidade relativa (superior à 10% em 24 horas) e/ou temperatura. O conjunto de aparelhos deve ser protegido contra a deposição de poeiras que se acumulando formam uma camada hygroscópica à superficie dos materiais. Evitar ao maximo atmosferas ricas em sais (corrosivos) isolando corectamente o local de conservação.

Armazenamento : para a segurança dos aparelhos e do pessoal do museu, o conjunto deve ser guardado numa zona pouca movimentada da reserva. Evitar as zonas de acesso à reserva onde a passagem de pessoas e materiais (por vezes pesados e voluminosos) é frequente. No entanto, a aparelhagem deve ser armazenada num sitio visivel, acessivel e conhecido pela totalidade do pessoal do museu. O acesso ao interior dos armários (portas laterais) deve ficar livre, com a possibiliade de abrir as portas na totalidade. O espaço entre cada armário deve permitir a passagem facil de uma pessoa com uma escada (no minimo 1 m de largura). Sempre que possivel, as âmpolas de vidro devem ser protegidas pelas placas e/ou grelhas de proteção. Quando isso não for possivel (inexistencia de proteção) o lado não protegido deve estar virado para uma zona onde o acesso é restringido (outro rectificador, por exemplo). Os aparelhos devem estar armazenados de uma maneira à garantir uma boa estabilidade, para evitar ao maximo as vibrações e movimentos. As bases dos rectificadores devem estar suportadas de uma maneira équilibrada (pelo menos nos quatro cantos). No caso da utilisação de palettes, são necessárias duas por rectificador, ou a utilisação de barotes de madeira para completar a base. A aparelhagem deve sempre estar protegida por um tecido (algodão ou outro tecido compativel) para evitar a deposição de poeiras. Os numeros e as letras de identificação dos rectificadores e das âmpolas devem sempre ficar no sitio, pois permittem localizar alterações observadas. Uma ficha de advertência de perigo (presente em anexo) deve ser colacada em cada armário de uma maneira visível.

Vigilância : inspeções regulares (no minimo uma vez por ano) devem ser efectuadas nesta aparelhagem. Estas inspeções devem permitir identificar acidentes ocoridos (ruptura, folga das âmpolas) e/ou observar a évolução de alterações existentes e identificar novas alterações. A lista seguinte fornece as informações quanto às prioridades de observação durante uma inspeção da aparelhagem :

❶ *Ampolas de vidro :* observar bem a totalidade das superficies das âmpolas, principalmente as zonas de soldadura vidro – vidro, no sentido de identificar fissuras ou outras alterações. Alguns defeitos de fabricação podem ser confundidos com fissuras. Geralmente, uma fissura concerna a espessura toda do vidro e é identificavel passando um objecto duro ou uma unha no sentido perpendicular a esta ultima (deve-se sentir uma resistencia ou asperidade). Mesmo assim pode tratar-se so de um risco. Medição de fissura identificada acima da soldadura do braço esquerdo da âmpola B do rectificador n°2 (5 cm na altura da identificação). Medição do deslocamento da âmpola B do rectificador n°1 (traço vermelho), à nivel da pata de sustenção (1.5 cm na altura da identificação). Verificar o estado de consevação das conecções eléctricas, especialment as duas conecções do cátodo que aguentam o peso do mercúrio.

❷ *Armaturas :* observar a évolução dos fenomenos de corrosão, especialmente nas patas de sustenção e nas zonas de soldaduras. A observação de produtos de alteração voluminosos e com cor acastanhado-alaranjado e o destacamento da tinta confirmam a presença de uma corrosão activa. Renovar a aplicação do produto anticorrosivo BALLISTOL (Klever) cada dois anos.

❸ Armários : verificar a évolução da deformação das grelhas superiores (não podem aproximar-se demais das âmpolas). Obseração do estado geral (tinta, corrosão, etc.).

RECOMENDAÇÕES DE MANIPULAÇÃO / TRANSPORTE

De uma maneira geral, a manipulação da aparelhagem, deve ser limitada ao minímo necessário. Pois cada manipulação constitui risco de fractura das âmpolas e de fragilisação do conjunto. Cada manipulação devera ser planeada em conjunto (n° de pessoas, movimentos, etc.) com antecedencia e todas as pessoas envolvidas deverão estar informadas dos perigos e das normas de segurança ligados a esta aparelhagem ; a presente ficha de segurança pode servir de meio de informação. Todas as pessoas envolvidas deverão usar óculos de proteção. Em relação ao planeamento da manipulação, algumas regras devem absolutamente ser respeitadas :

Movimentos : verificar que as portas laterais estão bem trancadas, manter sempre os rectificadores na posição vertical durante toda a manipulação e evitar todos os movimentos bruscos ou choques. Nunca fazer pressão (mesmo minima) nas âmpolas e especialmente nos braços de vidro e evitar todo o contacto com objectos duros (metal, etc.).

Meios de levagem : nunca pegar nos rectificadores pelas âmpolas ou armaturas das âmpolas. A unica parte segura para ligaçao de sistemas de levagem é a estrutura metálica dos armários. Usar meios de fixação seguros e sempre adaptar o sistema de maneira ao rectificador ficar a nível. Sempre verificar o estado de conservação da partes usadas para fixação antes de proceder à manipulação.

Transporte : a carga e a descarga deverão ser efectuados pela mesma equipa. Se o meio de transporte usado for de caixa aberta, tapar (tabuas de madeira) todas as partes dos rectificadores onde as âmplas estão expostas ao ar livre. Adaptar a velocidade do meio de transporte ao estado da estrada, evitar travagens bruscas, evitar buracos ou iregularidades da estrada e moderar a velocidade durante as curvas. O transporte do mercúrio é sujeito à legislação relativa ao transporte de produtos químicos.

RECOMENDAÇÕES EM CASO DE TRABALHO DE RESTAURO

As recomendações relativas à manipulação também valem para as intervenções de restauro. Como uma manipulação, um trabalho de restauro previsto para esta aparelhagem deve ser planeado com antecedencia e as pessoas envolvidas devem ser informadas dos perigos e das normas de segurança. A área de trabalho deve ser preparada antes de começar a intervenção e de uma maneira a fornecer um espaço suficiente para os movimentos das pessoas envolvidas. Durante todo o periodo de intervenção, o acesso deve ser proibido a todas as pessoas não envovidas no trabalho de restauro ou não acompanhadas por uma pessoa responsável. Um recipiente de retenção cuja capacidade é superior á 2 litros e a área superior à 2500 cm^2 deve ser colocado por baixo da âmpola onde se effectua o trabalho. De uma maneira geral, o trabalho de restauro deve ser planeado com o minimo de manipulações possiveis e as âmpolas só devem ser retiradas dos armários no caso de não existir outra solução para a applicação do tratamento de restauro. Se as âmpolas devem ser retiradas dos armários, as seguintes etapas devem ser respeitadas :

❶ As pessoas envolvidas devem usar óculos de proteção e luvas e isso durante toda a intervenção ;
❷ Desmontar as placas de protecção superiores e medianas laterais dos armários (duas pessoas) ;
❸ Abrir a porta lateral e retirar a cavilha que permite manter a estrutura e a âmpola em posição ;
❹ Desconectar as coneções eléctricas (anódos, cátodos e eléctrodos) – os parafusos devem ser desmontados à mão (sem uso de ferramentas) e com um esforço minimo ;
❺ Puxar a estrutura metálica para fora do armário pela porta lateral (duas pessoas) fazendo deslizar os elementos de apoio da estrutura sobre as baras soldadas ao armário. Pegar nos quatro cantos da estrutura (quatro pessoas) e tirar-lá para fora do armário mantendo sempre o conjunto a nivel e evitando movimentos bruscos ;
❺ No caso da necessiade de retirar a âmpola da estrutura, sempre pegar nela pela base e nunca pela parte superior ou pelos braços de vidro. Colaca-lá num suporte especialmente preparado.
❻ Para voltar uma âmpola de vidro de rectificador consultar a documentação : Redresseurs à vapeur de mercure à ampoule en verre, Ateliers de Construction Eléctriques de Charleroi, 1954, Belgique.

RECOMENDAÇÕES EM CASO DE ACIDENTE

Um derame de mercúrio deve ser levado muito a sério, pois uma decontaminação incompléta pode levar à contaminação dos outros locais do museu, dos carros e das casas das pessoas envolvidas, etc. Um procedimento de decontaminação compléto pode requerer material especifico como metodos de medição de concentrações de mercúrio no ar ou aspirador específico para mercúrio que so empresas especialisadas possuem. A decontaminação de um deramo importante de mercúrio não deveria, por conseguinte, ser realisado por pessoas não treinadas (pessoal do museu) para este tipo de intervenção. No caso de um deramo de mercúrio (ruptura de âmpolas ou outro), as seguintes étapas devem ser realisadas :

❶ Em caso de implosão de uma âmpola, afastar-se e não voltar júnto deste antes de ter ventilado a area. Verificar que os sapatos as roupas ou outros elementos das pessoas envolvidas não estão contaminados por mercúrio, evacuar a area e proibir o acesso a qualquer pessoa ;
❷ Abrir os acessos (portas, janelas) exteriores ao local e fechar os acessos interiores, desligar o sistema de aquecimento e de ventilação do local ;
❸ Determinar se o deramo pode ser recolhido pelo pessoal do museu. Geralemnte, uma quantidade superior a 500 g (33 ml) é considerada como importante e requer a intervenção de uma empresa especialisada. A área contaminada e o tipo de superficie envolvida tambem são factores que influenciam a importáncia do deramo. Quanto maior é a area contaminada e mais iregular é a sua superficie, mais dificil será a decontaminação a realisar. Por exemplo, um chão de madeira como o da reserva do Museu da Indústria pode ser muito problemático (porosidade e fendas).

No caso do deramo ser considerado como minimo e avaliado como podendo ser descontaminado pelo pessoal do museu, deve-se proceder ás seguintes etapas usando o kit para decontaminção de mercúrio guardado na resreva do museu :

O trabalho deverá ser efectuado com calma e com todo o tempo necessário. Toda a precipitação aumentara o risco de espalhar o deramo (pisando o mercúrio) e de realizar uma decontaminação incomplêta.

❶ Por luvas, óculos, bata e sacos de plástico por cima dos sapatos para evitar o transporte de mercúrio pelas solas e iluminar a zona contaminada com uma luz potente (foco) ;
❷ Apanhar o mercúrio visível (gotas grandes : seringa ; gotas medias : folhas de papel ; gotas pequenas : fita adhesiva) juntando tanto que possivel as esferas umas as outras. Sempre proceder do exterior para o centro da zona contaminada. Guardar o mercúrio num recipiente hermético que não se pode quebrar (polyetileno ou ferro) contendo uma camada de um ou dois centîmetros de paraffina liquida (limita a evaporação). As fitas adhesivas usadas e todo o material que teve em contacto com mercúrio devera ser guardado dentro de dois sacos de plástico sobrepostos ;
❸ Uma vez o mercúrio visível apanhado, recomecar a observação na totalidade da zona cotaminada – se for necessário usar uma lampada elétrica – para identificar potenciais resíduos de mercúrio ;
❹ Aplicar (com um peneiro) enxofre (flor) ou zinco em pó sobre a zona contaminada, especialmente nas fendas ou zonas porosas. Reagindo com o mercúrio, o enxofre torna-se acastanhado, permitindo identificar e limitar a evaporação do mercúrio residual, enquanto o zinco amalgama-se ao mercúrio. Tapar a zona com um filme de plastico (polietileno), selar os lados com fita adhesiva e deixar durante um ou dois dias (esfregar cada dia a superficie do plástico para facilitar a reação). Retirar o enxofro (ou zinco) com panos molhados com agua e deita-los no lixo doméstico ;
❺ A zona contaminada pode ser lavada com panos embebidos de vinagre seguido de uma lavagem com panos molhados de peroxido de hydrogénio (nunca aplicar nos objectos do museu) ;
❻ Identificar os frascos contendo mercúrio e o lixo contaminado (resíduos cotaminados com mercúrio) com os simbolos adequados (tóxico e perigoso para o ambiente).

ATENCAO ! Um chão de madeira como o da reserva do Museu da Indústria nunca poderá ser completamente descontaminado. Uma solução consiste em celar a zona contaminada com uma tinta ou um verniz (epoxy, poliuretano ou outro agente celante).

INFORMAÇÕES SOBRE MERCURIO

Gestão / Tóxicidade :

- International Programme on Chemical Safety **IPCS -** http://www.inchem.org/
- World Health Organisation **WHO -** http://www.who.int/en/
- United Nations Environmental Programme **UNEP -** http://www.unep.org/
- The European Chemicals Bureau **ECB -** http://ecb.jrc.it/
- Centre Canadien d'hygiène et de sécurité du travail **CCHST -** http://www.cchst.ca/
- Northeast Waste Management Official's Association **NEWMOA -** http://www.newmoa.org/
- Collaborative Mercury Research Nettwork - www.unites.uqam.ca/comern/index.html
- Mercury Technology Services **MTS -** http://www.hgtech.com/
- The Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) - www.atsdr.cdc.gov
- TOXNET - http://toxnet.nlm.nih.gov/
- Occupational Safety & Health Administration - www.osha.gov
- Mercury Exposure - www.mercuryexposure.org
- Be Mercury Free - www.bemercuryfree.net
- US Protection Agency EPA - http://www.saudepublica.web.pt/

Legislação *:*

Europa

- EUR-Lex - http://europa.eu.int/eur-lex/lex/
- European Agency for safety and Health at work - http://osha.eu.int/
- Centre Canadien d'hygiène et de sécurité du travail **CCHST -** http://www.cchst.ca/

Portugal

- A Direcção-Geral das Autarquias Locais - http://www.dgaa.pt/
- Instituto do Ambiente (IA) - http://www.iambiente.pt/
- Portal de Saúde Pública - http://www.saudepublica.web.pt/

A20 - FICHES TECHNIQUES DU PRODUIT BALLISTOL® ET WD-40®

BALLISTOL
MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Manufacturer: Washington Trading Company, Inc.
Ballistol USA
One Cypress Knee Trail
Kitty Hawk, NC 27949
Tel.: 252-261-6181

Product: Ballistol is an alkaline, emulsifying oily cleaner, and lubricant, and corrosion inhibitor.

☐ **Hazardous Ingredients Information** Ballistol does not contain any components classified "hazardous" by OSHA. Ballistol contains only one ingredient with TLVs:

Ingredient	OSHA PEL	ACGHI TLV
Isobutyl Alcohol	100 ppm TWA	50 ppm TWA

☐ **Physical Characteristics**

Boiling Point		128 °C (262.4 °F)
Evaporation Rate		Moderate at 20 °C (68 °F)
Pour Point		-17 °C (1.4 °F)
Solubility in Water		Not easily. Emulsifies.
Specific Gravity at 20 °C (68 °F)	Oil:	0.865 g/cm³
	Spray:	0.775 g/cm³
Appearance		Yellowish oil.
Odor		licorice

☐ **Reactivity Data**

Stability	Stable.
Incompatibility	None known.
Hazardous polymerization	Not known to occur.
Hazardous decomposition	None known .

☐ **Fire and Explosion Information**

Flash point	52 °C (126 °F)
Flammable limits (LEL/UEL)	Not applicable.
Extinguishing media	Foam, carbon dioxide, water.
Special fire fighting procedures	Do not use dry powder as extinguishing medium. Wear protective gear and self-contained breathing apparatus as necessary under conditions.
Special fire / explosion hazards	Should be treated as flammable aerosol although product has not been tested as such to ASTM standards. Butane / propane (A-70) used as propellant.

☐ **Health Hazard Data**

Routes of Entry:

Inhalation	Aerosol Spray -Possible / Non-Aerosol Oil-Not Probable
Ingestion	Possible.
Absorption through skin	Insignificant if any.

Acute and Chronic Health Hazards:
No LD-50 oral could be determined for Ballistol with rats and rabbits. Manufacturer classifies product as non-poisonous. Ballistol does not contain Benzene or Kerosene.

Carcinogenicity:
No NTP publication. No IARC monograph. Ballistol is based on medicinal grade white mineral oil, (CAS # 8042-47-5) which has been classified "Class 3" by the IARC. This means that there is insufficient evidence for this substance to cause cancer in animals or humans. Ballistol does not contain any substance currently known to be a carcinogen.

Signs and Symptoms of Exposure	None known.
Medical Conditions Generally Aggravated by Exposure	None known.

Emergency and First Aid Procedures:
In the event of contact with eyes or skin, flush with large quantities of water. If ingested, DO NOT INDUCE VOMITING, ASPIRATION COULD OCCUR. Consult with physician immediately.

☐ Control and Protection Information

Respiratory Protection Information	Not required.	Eye Protection	Not normally required.
Ventilation	Locally as needed.	Protective gloves	Not required.
Mechanical	As needed.	Other Protective Clothing	Not normally required.

Work & Hygienic Practices:
Avoid contact with eyes. Use in ventilated area. Do not use around flame or hot surface. Do not spray into open flame. Do not puncture aerosol container.

☐ Safe Handling and Disposal Information

Steps to Take in Case of Spill:
Wipe up with absorbent rags. Use oil absorbent material. Sweep up and place in container. Wash area with warm water and detergent to eliminate slipperiness.

Waste Disposal Method:
Follow applicable Federal and local regulations.

Handling and Storage:
Store in cool dry place out of sunlight. Do not store in areas exposed to temperatures above 49 °C (120 °F). Store and use in ventilated room. Keep away from hot surfaces. Keep out of reach of children.

☐ Transportation Data

	Aerosol	Non-Aerosol
Description:	Aerosols, flammable	Petroleum Distillate n.o.s.
ID Number:	UN1950	UN1268
Hazard Class:	2.1	3
Packaging Group:	NONE	III
Domestic Surface:	Consumer Commodity, ORM-D	Consumer Commodity,ORM-D, for inner containers no more than one gallon.
Air:	Check with Dangerous Goods desk, or call WTC, Inc.	

Disclaimer
The information and statements contained in this document have been obtained from the manufacturer and from recognized reference sources as provided to or obtained by the Washington Trading Company. Inc. (WTC). WTC believes the information in this document to be true and reliable but expressly disclaims any liability for providing such information and toxicological data.

This document was prepared by the Washington Trading Company, Inc. in June of 1994. Last revision: July 2005 .

Acronyms:

LEL	=	Lower Exposure Limit
UEL	=	Upper Exposure Limit
LD 50	=	Median Lethal Dose. It is the dose at which 50% of a given population will experience fatalities due to a chemical substance.
NTP	=	National Toxicological Program.
IARC	=	International Agency for Research on Cancer.

PEL	=	Permissible Exposure Limit (as set by OSHA).
CAS	=	Chemical Abstract Service
TLV	=	Threshold Limit Value

BALLISTOL
MATERIAL SAFETY DATA SHEET (cont.)

TECHNICAL DATA SHEETS FOR BALLISTOL

Contents

Ballistol contains medicinal grade mineral oil, alkaline salts of oleic acid, several alcohols, Benzyl Acetate and an oil from vegetal seeds. The mineral oil is unchlorinated and conforms to the specifications of US Pharmacopeia XX.

Volatile Organic Components (VOCs)

As an aerosol Ballistol contains 33.8% VOCs. As a non-aerosol it contains 5.3% VOCs.

Propellants

Ballistol aerosols contain A-70 (a Butane, Propane blend) as propellants. The pressure inside the full can is 7-7.5 bars. Ballistol aerosols contain 14% Isohexane as a thinner.

Risk of Explosion

Theoretically a risk of explosion exists with the use of Butane and Propane as propellants for Ballistol aerosols. However, the actual risk is quite negligible, as the following information illustrates:

Explosion Limit / Propellant	Butane	Propane
Lower Explosion Limit (LEL)	1.5 vol.% (37 gr. / cm^3)	2.1 vol.% (39 gr. / cm^3)
Upper Explosion Limit (UEL)	8.5 vol.% (210 gr. / cm^3)	9.5 vol.% (180 gr. / cm^3)

In order to produce an explosive mix of Propane or Butane with air an entire 11 oz. aerosol can of Ballistol would have to be emptied into one cubic meter of air and retained in this space. If any leakage occurred, the LEL would not be reached. It is obvious that for practical purposes the risk of explosion using Ballistol aerosols is fairly insubstantial.

Electrical Properties of Ballistol

Ballistol has a comparatively high dielectric strength. Its electric conductivity is 0.005 Micro-Siemens / cm. This is 1/60 of the electric conductivity of water (0.3 Micro-Siemens / cm). Undiluted and unemulsified Ballistol has an Ohmic resistance

of approx. 800 Kilo-Ohms. For most practical purposes Ballistol can be considered a non-conductor. However, Ballistol does have the characteristic of a weak electrolyte due to the free ions contained in it. This characteristic diminishes with age and with extended exposure to an acidic environment. It increases, when Ballistol is emulsified with water.

Therefore, Ballistol, in its non-emulsified form, will not interfere with the flow of electric current in electrical networks or devices. It will not normally build electrical bridges or cause creeping currents or short circuits to occur, even if applied directly on electrical equipment while energized. Ballistol should not be applied to electrical or electronic equipment while water or a high degree of moisture are present in the equipment.

Ballistol has been tested by GTE Testmark Laboratories (now Inchcape Laboratory) in 1994 for its compatibility with Alcatel and Siecor telecommunication cable insulation. It was found to slightly decrease the tensile strength and to significantly increase the elongation of HDPE insulation material. It was also found to improve the DC insulation capability of the HDPE material by factor 5 at 3,000 and 10,000 Volts DC. (See attached).

Warning: Ballistol should not be applied on electrical installations while they are wet from rain or condensation water or similar, since this may cause a short circuit. When electrical installations, which have been treated with Ballistol, are exposed to direct contact with a significant amount of water, a short circuit may result, since Ballistol is a lubricant, not a water blocker.

Compatibility of Ballistol with Other Materials

Ballistol is fully compatible with all metals including aluminum. However, Ballistol dissolves traces of copper, zinc, lead and tombac and can, therefore, be used to clean brass, bronze and silver.

BallistoL is compatible with all types of unfinished woods. Ballistol is compatible with paints and varnishes which are chemically resistant to petroleum. Caution is recommended when using Ballistol on antique furniture or antique musical instruments. Paints and varnishes from past centuries may not be resistant to Ballistol.

Ballistol can be used on all smooth leathers. Its use on suede is not recommended, since it will spoil its looks. Ballistol can be emulsified with water and mixed with gasoline, diesel fuel or antifreeze. Ballistol will chemically interact with and partially or fully neutralize substances of an acidic nature such as, but not limited to, human sweat, battery fluid, residues from tannic acid in leather.

Ballistol - Alkalinity

Ballistol has a pH of between 8.5 and 9.5. This variance occurs, because the pH of Ballistol can only be measured, when Ballistol is emulsified with water and because the concentration of Hydronium ions varies with the concentration of Ballistol in the emulsion. With an emulsion of 50 gr. of Ballistol in 1000 gr. of water a pH of 9 should normally result.

Ballistol as a Corrosion Inhibitor

Most corrosion inhibiting lubricants can only protect against normal oxidation. They do so by covering up the surface, which they are supposed to protect, and prevent contact with water and air. Due to its alkalinity Ballistol can also protect against galvanic corrosion, acidic corrosion and salt water corrosion. Ballistol contains oxygen binders. They make the oxygen, contained in water or air, unavailable for oxidation. Due to its low surface tension, Ballistol is capable of creeping into the smallest openings even against gravity. Accordingly, Ballistol provides not only passive but also active protection against corrosion. However, Ballistol is not a permanent coating or paint. Its protective effect will be the stronger the more often it is re-applied.

Kinematic Viscosity

The following values have been established for the kinematic viscosity of Ballistol Liquid in Centistokes:

Temp. of Ballistol	Centistokes
10 C	73.2
20 C	41.8
30 C	28.0
40 C	19.5
50 C	13.9

Due to anti-oxidants contained in it Ballistol will not easily harden or gum up. It retains its lubricity over extended periods of exposure. Due to its extreme purity the mineral oil contained in Ballistol survives autoclaving and leaves enough of a mineral oil film behind to provide a reasonable measure of lubrication and corrosion prevention even after autoclaving. As an emulsifying oil Ballistol does not lose its capability to lubricate in the presence of water.

Physical Indicators

Vapor Pressure:	Aerosol:	5 hP
	Non-aerosol:	6.5 mbar at 20 C
		10.0 mbar at 50 C
Flame Point:	51 C	
Self Ignition Point:	400 C (when oxygen present)	
Disintegration Point:	Approx. 500 C (when no oxygen present) Thermic disintegration beginning at approx. 400 C	
Evaporation Rate:	At 20 C:	14% in 40 hours
		28% in 480 hours
	At 107 C:	15% in 0.5 hours
		30% in 12 hours

Non-Toxicity

In experiments with rats and rabbits the animals' entire intestinal tracti and stomachs were filled with Ballistol. The animals showed signs of uneasiness. After the Ballis tol had been evacuated from their bodies as provided for by nature, the animals without exception appeared to be in excellent condition and showed no adverse prolonged side effects. It was not possible to establish an LD 50.

Ballistol does not contain ingredients considered hazardous by OSHA. It does not contain any ingredients, which

normally may be considered harmful or fatal if swallowed, BUT DO NOT INDUCE VOMITING, ASPIRATION CAN OCCUR. CONSULT A PHYSICIAN IMMEDIATELY. It does not contain any ingredients which may be toxic for warm-blooded organisms, reptiles or aquatic organisms, **if used as directed**. However, Ballistol may kill small insects such as aphids, mites, chiggers, ants, termites, spiders or wasps etc. by mechanically clogging up their respiratory systems, as most oils will.

Ballistol does not contain any ingredients known to cause cancer such as 1,1,1 Trichloroethane, 1.1,2,2 Tetrachloroethylene, tar, Teflon (Polytetrafluorethylene) or Silicone. Ballistol does not contain chlorine or chlorinated substances. Ballistol aerosols do not contain CFCs. The Isohexane contained in Ballistol aerosols as a thinner containes less than 3% n-Hexane, which make it non-toxic. Ballistol meets the criteria of the Federal Trade Commission for the claim of biodegradability. It has been found to biodegrade and/or photodegrade within a period of approximately 24 months in aerobic decomposition as defined by OECD approved closed bottle tests.

Further Information

For further technical information about Ballistol contact Washington Trading Company, One Cypress Knee Trail, Kitty Hawk, NC 27949, phone: 252- 261-6181 fax: 252-261-0408 email doug@ballistol.com.

This document was prepared by the Washington Trading Company, Inc. in June of 1994. Last revision: July 2005.

Fiche Technique

WD-40

Caractéristiques Physiques

Couleur : Ambre clair
Odeur Caractéristique, très légère et agréable
Poids spécifique à 20°C 0,817 ± 0,020.
Viscosité à 22°C 27,5 ± 1,0 sec. Zahn à 22°C
Point d'éclair (minimum) : 43°C "open cup" (minimum)
Pourcentage non volatile: 22% en poids.
Pourcentage volatil (max.) : 78% en poids de distillats pétroliers aliphatiques.
Point de goutte : inférieur à - 73°C
Stabilité à basse température : Excellente (Échantillon refroidi à - 73°C et réchauffé à température ambiante - ceci 4 fois sans altération)
Pouvoir couvrant 15 à 26 M² par litre
Point d'ébullition (commençant)149°C (minimum)
Poids : 1,7 gram par M²
Epaisseur : 0,00025 à 0,00075 cm
Température d'usage-73°C à + 260°C

Effets sur Matériaux

Général: Presque tous les matériaux réagissent à WD-40 comme ils le feraient à des distillats pétroliers aliphatiques s'ils étaient exposés de la même façon, c'est à dire: pulvérisation, bain rapide, immersion prolongée.

Caoutchouc: Aucun effet visible sur les surfaces de différents types de caoutchouc pulvérisés avec WD-40. Certains caoutchoucs gonfleront s'ils sont immergés de façon prolongée dans WD-40.

Peintures: Plusieurs types de peintures sur plusieurs surfaces différentes ont été exposés à WD-40 sans aucun effet. Les vernis à base de cire ainsi que certains revêtements à base de cire peuvent être ramollis par WD-40.

Plastiques: les plastiques suivant ont été immergés dans WD-40 pendant 168 heures sans effets visibles:
Polyéthylène – Formica – Résine Epoxide -Delrin - Polypropylène – Acrylique –Vinyle - Téflon (PTFE) – Polyester - Nylon
Mais, poly carbonates et les polystyrènes transparents peuvent craqueler ou même craquer au contact de WD-40.

Tissus: Les tissus suivants ont été exposés à WD-40 et n'ont souffert d'aucun effet, mis à part des taches légères qui ont pu être enlevées rapidement avec du naphte ou avec des solvants pour nettoyage à sec: Nylon, Orlon, Laine, Tergal, Coton..

Nota Bene: Application de revêtements permanents par-dessus WD-40: Les meilleurs résultats seront obtenus lorsque la surface est nettoyée. Les alcools minéraux, les dissolvants de laque, les dégraissants de vapeur ou les nettoyants alcalins sont adéquats

Applications

WD-40 peut-être:

1. Pulvérisé sous forme d'aérosol ou vaporisé au pistolet.
2. Appliqué au pinceau
3. Utilisé en vrac (immersion)

Propriétés

Protection Anticorrosion

(sur une plaque d'acier doux fraîchement sablée)

Exposition	Résultats
Humidité (JAN-H-792)	Pas de rouille après 1000 heures
Pulvérisation saline (FED STD 151)	Pas de rouille après 50 heures
Pulvérisation saline (FED STD 151)	Apparition de rouille après 100 heures

Sous conditions réelles, la durée de protection due au WD-40 variera selon le type du matériau protégé et les conditions d'expositions. Généralement sur l'acier doux, la durée de protection sera à peu près la suivante:

1. Stockage intérieur ou couvert	Au moins 1 an
2. Stockage extérieur protégé	6 mois à 1 an
3. Exposition normale au intempéries	30 à 60 jours
4. Exposition sévère au intempéries (sur une plage ou à proximité, humidité intense, embruns et brouillards salins)	15 à 30 jours

Si l'on désire une protection plus longue, une nouvelle application de WD-40 s era nécessaire.

WD-40 : MIL-C 2341 1.

Lubrification

Coefficient dynamique de friction: mesuré entre 2 éprouvettes en acier 4340 bleu, normalement par chauffage et lubrifiées au WD-40.

PRESSION D'APPUI	COEFFICIENT
7 bar	0,112
70 bar	0,114
140 bar	0,129
210 bar	0,138
281 bar	0,145

Electrique

Utilisation de contacts d'Argent dans un appareillage et selon un procédé modifié de la norme ASTM B 182:
Résistance mesurée avec un courant continu de 1 ampères sous 12 volts, les contacts ayant été soumis sous une pression de 100g à des cycles de courant alternatif de 23 ampères sous 115 volts

	Contacts sans WD-40 (ohm)	Contacts avec WD-40 (ohm)	Résistance de contact du film (ohm)
Origine	0,0066	0,0083	0,0017
Après 5 cycles	0,0067	0,0085	0,0018
Après 100 cycles	0,0069	0,0086	0,0017
Après 1.000 cycles	0,0074	0,0085	0,0011
Après 20.000 cycles	0,0083	0,0098	0,0016

Tension de claquage ASTM D-877. 7(b) à 25° C 4.700 Volts par centimètre.

Emballages

Aérosols (sans fréon) de 200 ml et 400 ml.
Bidons de 5 litres et 25 litres..

DECLOEDT sa
world wide clean
Rue de Birmingham 56 • 1080 Bruxelles
☎. 02/410.01.86 • Fax: 02/410.00.84
Site: www.decloedt-wwc.be @: info@decloedt-wwc.be

Fiche de données de sécurité selon la directive de la CEE 91/155

1. Identification de la substance/préparation et de la société/entreprise

Identification de la substance ou de la préparation

WD-40 Aerosol

Utilisation de la substance/préparation
Lubrifiant
Protection anticorrosion

Identification de la société/entreprise (dénomination sociale)
Importateur général : e+h Services, Industriestrasse 14, CH - 4658 Däniken
Tél.: (062) 288 61 11 Télécopie: (062) 288 61 06

Numéro de téléphone d'appel d'urgence / service d'information
Service d'information pour les symptômes d'intoxication:
ORFILA (France) +33 (0)1.45.42.59.59
Centre Suisse d'Information Toxicologique (CSIT), CH-8030 Zurich: Tel. 145 (hors de la Suisse: +41 (0)44 251 51 51)
Numéro de téléphone d'appel d'urgence de la société:
Tél.: (062) 288 61 11

2. Composition / informations sur les composants

Aérosol
Sans:
CFC

2.1 Désignation chimique	Quantité en %	Symboles	Les phrases R	EINECS, ELINCS	CAS
Naphta lourd (pétrole), hydrotraité	60 - 80	Xn	10-65-66	265-150-3	64742-48-9
Dioxyde de carbone	1 - 5			204-696-9	124-38-9

Texte intégral des phrases R, voir rubrique 16.

3. Identification des dangers

3.1 Pour l'homme
Voir point 11 et 15.
La préparation est classée comme dangereuse au sens de la directive 1999/45/CE.
Le produit est inflammable
Danger d'éclatement en cas d'échauffement.
L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.

3.2 Pour l'environnement
Voir point 12.
Eventuelle dégradation des eaux par hydrocarbures.
Le produit peut former un film sur la surface de l'eau qui peut empêcher l'échange d'oxygène.

4. Premiers secours

4.1 Inhalation
Transporter la victime à l'air frais.
Eloigner la victime de la zone dangereuse.
Arrêt respiratoire - appareils de respiration artificielle nécessaire.

4.2 Contact avec les yeux
Rincer abondamment à l'eau pendant plusieurs minutes. Si nécessaire, consulter le médecin.

4.3 Contact avec la peau
Laver abondamment à l'eau et au savon et ôter immédiatement les vêtements contaminés et éclaboussés. En cas d'irritation de la peau (rougeur, etc.) consulter le médecin.

4.4 Ingestion
Rincer soigneusement la bouche avec de l'eau.
Consulter immédiatement le médecin
avoir la fiche de données sur soi.
Ne pas provoquer de vomissement.
Danger d'aspiration.

4.5 Moyens spéciaux nécessaires pour les premiers secours
n.g.

5. Mesures de lutte contre l'incendie

5.1 Moyen d'extinction approprié
Mousse
CO2
Poudre d'extinction
Refroidir les récipients en danger avec de l'eau.

5.2 Moyen d'extinction à ne pas utiliser pour des raisons de sécurité
Eau

5.3 Risque particulier résultant de l'exposition à la substance / préparation en tant que telle, aux produits de la combustion, aux gaz produits
En cas d'incendie peuvent se former:
Danger d'éclatement en cas d'échauffement.
Oxydes de carbone

5.4 Équipement de protection spécial pour le personnel préposé à la lutte contre le feu.
Selon l'étendue de l'incendie.
Appareils respiratoires autonomes.

5.5 Autres indications
Eliminer l'eau d'extinction contaminée conformément aux prescriptions locales en vigueur.

6. Mesures à prendre en cas de dispersion accidentelle

Voir rubrique 13, ainsi que l'équipement de protection individuelle, voir rubrique 8.

6.1 Les précautions individuelles
Tenir à l'écart des sources d'ignition, défense de fumer.
Assurer une ventilation suffisante.
Eviter tout contact avec la peau et les yeux ainsi que l'inhalation.
Ne pas porter de chiffons de nettoyage imbibés de produit dans les poches de pantalon.

6.2 Les précautions pour la protection de l'environnement
En cas de fuite importante, colmater.
Ne pas jeter les résidus à l'égout.
Eviter la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines ainsi que du sol.

6.3 Les méthodes de nettoyage
En cas de dégagement d'aérosol / de gaz, assurer l'alimentation suffisante en air frais.
Substance actif:
Recueillir avec des liants pour liquides (p.ex.: liant universel, sable) et éliminer selon le point 13.

7. Manipulation et stockage

7.1 Manipulation
Informations pour une manipulation sans danger:
Voir point 6.1
Assurer une bonne ventilation des lieux.
Tenir à l'écart des sources d'ignition - Défense de fumer.
Observer les indications sur l'étiquette et la notice d'utilisation.
Appliquer les modes de fonctionnement selon le mode d'emploi.

7.2 Stockage
Exigences relatives aux entrepôts et récipients:
Ne pas stocker le produit dans les couloirs ou dans les escaliers.
Respecter les règlements spéciaux sur les aérosols.
Observer la régl. de gaz technique TRG 300 (prescription allemande).

Conditions de stockage particulières:

Voir point 10.2
A protéger contre les rayons solaires et ne pas exposer à une température supérieure à 50°C.
Conserver au sec.
Conserver au frais

8. Contrôle de l'exposition / protection individuelle

Assurer une bonne aération. Ceci peut être obtenu par une aspiration locale ou une évacuation générale de l'air.
Si cela ne suffit pas pour maintenir la concentration à un niveau inférieur aux valeurs maxi autorisées sur les lieux de travail (VME, TLV, AG), il convient de porter une protection respiratoire appropriée.
Valide uniquement quand des valeurs limites d'exposition sont ici indiquées.

(F) Désignation chimique	Naphta lourd (pétrole), hydrotraité	
VME: 1000 mg/m3 (Hydrocarbures en C6-C12 (ensemble des, vapeurs)) (VME), 200 ppm (1000 mg/m3) (AG)	VLE: 1500 mg/m3 (Hydrocarbures en C6-C12 (ensemble des, vapeurs)) (VLE), 4 (AG)	VNJD: ---
IBE: ---	Autres informations: TMP n° 84, FT n° 84, 94, 96, 106, 140 (Hydrocarbures en C6-C12 (ensemble des, vapeurs))	

(CH) Désignation chimique	Naphta lourd (pétrole), hydrotraité	
MAK / VME: 100 ppm (525 mg/m3) (White Spirit)	KG / VLE: ---	---
BAT / VBT: ---	Sonstiges / Divers: ---	

(F) Désignation chimique	Dioxyde de carbone	
VME: 5000 ppm (ACGIH), 5000 ppm (9100 mg/m3) (AG), 5000 ppm (9000 mg/m3) (CE)	VLE: 30000 ppm (ACGIH), 4 (AG)	VNJD: ---
IBE: ---	Autres informations: DFG (AG)	

(CH) Désignation chimique	Dioxyde de carbone	
MAK / VME: 5000 ppm (9000 mg/m3)	KG / VLE: ---	---
BAT / VBT: ---	Sonstiges / Divers: ---	

(F) Désignation chimique	Huiles minérales (brouillards)	
VME: 5 mg/m3 (ACGIH)	VLE: 10 mg/m3 (ACGIH)	VNJD: ---
IBE: ---	Autres informations: ---	

(CH) Désignation chimique	Huiles minérales (brouillards)	
MAK / VME: 0,2 mg/m3 e	KG / VLE: ---	---
BAT / VBT: ---	Sonstiges / Divers: ---	

(F) VME = Valeurs limites de moyenne d'exposition, a = fraction alvéolaire, t = fraction thoracique (France). // I/R = fraction inhalable/respirable, V = Vapeur et Aerosol, F = fibres respirable (long = >5µm, aspect ratio >= 3:1), T = fraction thoracique (ACGIH, E.U.A.). // E/A = fraction inhalable/alvéolaire (AG (TRGS 900), Allemagne). | VLE = Valeurs limites d'exposition à court terme (France). // =1=, 1, 2, 3, 4 = Catégorie et factor AG pour les limitations d'exposition (TRGS 900, Allemagne). | VNJD = Valeur à ne jamais dépasser (France). // TLV-C = Threshold Limit Value - Ceiling limit (ACGIH, E.U.A.). | IBE = Indicateurs biologiques d'exposition (France). ACGIH-BEI = "Biological Exposure Indices" de l'ACGIH (États-Unis d'Amérique). BG = "Biologischer Grenzwert" (Valeurs limites biologique) (TRGS 903, Allemagne). Prélèvement: B = Sang, Hb = Hémoglobine, E = Erythrocytes (globules rouges), P = Plasma, S = Sérum, U = Urine, EA = end-exhaled air (air expiré en fin d´expiration). Période de prélèvement: a = Aucune restriction / non critique, b = en fin de travail posté, c = après une semaine de travail, d = au bout d´une semaine de travail posté, e = avant le dernier service d´une semaine de travail, f = pendant l´équipe de travail, g = avant le début du poste. | TMP n° = n° d. tableaux de maladies professionelles. FT n° = n° de la fiche toxicologique publiée par l'INRS. Observations: * = risque de pénétration percutanée / C1, C2, C3 = substance classée cancérogène de cat. 1, 2 ou 3 / M1, M2, M3 = substance classée mutagene de cat. 1, 2 ou 3 / R1, R2, R3 = substance classée toxique pour la reproduction de cat. 1, 2 ou 3 / All = risque d'allergie, AC = risque d'allergie cutanée, AR = risque d'allergie respiratoire) (France).

(CH) MAK / VME = Maximaler Arbeitsplatzkonzentrationswert / Valeur moyenne d'exposition | KG / VLE = Kurzzeitgrenzwert / Valeur limite d'exposition | BAT / VBT = Biologischer Arbeitsstofftoleranzwert / Valeurs biologiques tolérables. Untersuchungsmaterial: B = Vollblut, E = Erythrozyten, U = Urin, A = Alveolarluft, P/Se = Plasma/Serum. Probennahmezeitpunkt: a = keine Beschränkung, b = Expositionsende, bzw. Schichtende, c = bei Langzeitexposition: nach mehreren vorangegangenen Schichten, d = vor nachfolgender Schicht. / Substrat d'examen: B = Sang complet, E = Erythrocytes, U = Urine, A = Air alvéolaire, P/Se = Plasma/Sérum. Moment du prélèvement: a = indifférent, b = fin de l'exposition, de la période de travail, c = exposition de longue durée: après plusieurs périodes de travail, d = avant la reprise du travail. | Sonstiges / Divers: H = Hautresorption möglich / résorption via la peau pos. S = Sensibilisator / sensibilisateur. K = Kanzerogene Wirkung / effet cancérigène. P = provisorisch / provis. A,B,C,D = Gruppe/cat. Repr.Tox.

8.1 Protection respiratoire: Normalement pas nécessaire.
En cas de dépassement de la VME, TLV(ACGIH) ou AG.
Filtre A P 3 (EN 141)
8.2 Protection des mains: Gants protecteurs en nitrile (EN 374)
8.3 Protection des yeux:

Lunettes protectrices hermétiques avec protections latérales (EN 166).
8.4 Protection de la peau:
Vêtement de protection (p. ex. gants de sécurité EN 344, vêtement de protection à manches longues)
Information supplémentaire relative à la protection des mains - Aucun essai n'a été effectué. Dans les préparations, la sélection a été effectuée de bonne foi, en tenant compte des informations relatives aux composants.
La sélection des substances a été faite à partir des indications fournies par les fabricants de gants.
Le choix définitif du matériau des gants doit être effectué en tenant compte de la durée de résistance à la rupture, des taux de perméation et de la dégradation.
Le choix des gants appropriés ne dépend pas uniquement du matériau, mais aussi d'autres caractéristiques de qualité, laquelle diffère d'un fabricant à l'autre.
La résistance du matériau utilisé pour les gants n'est pas prévisible, il convient donc de faire un test avant leur utilisation. Consulter le fabricant de gants de protection pour apprendre la durée exacte de résistance au perçage et respecter cette indication.

9. Propriétés physiques et chimiques

Etat physique:	Aérosol
Couleur:	Brun clair
Odeur:	Caractéristique
Point/intervalle d'ébullition (en°C):	n.v.
Point/intervalle de fusion (en°C):	n.v.
Point d'éclair (en°C):	44
Inflammabilité (solide, gaz):	Oui
Limite inférieure d'explosibilité:	0,6 Vol%*
Limite supérieure d'explosibilité:	8,0 Vol%*
* Naphta lourd (pétrole), hydrotraité	
Pression de vapeur:	7,2 bar (20°C), 9,4 bar (50°C)
Densité (g/ml):	0,84
Hydrosolubilité:	Insoluble
Liposolubilité / solvant-huile:	n.g.
Viscosité:	< 1 cSt

10. Stabilité et réactivité

10.1 Conditions à éviter
Voir point 7
L'augmentation de pression entraîne un danger d'éclatement.
Récipient sous pression. A protéger contre les rayons solaires et à ne pas exposer à une températures supérieure à 50°C. Ne pas percer ou brûler même après usage.

10.2 Matières à éviter
Voir aussi point 7.
Eviter tout contact avec des agents d'oxydation forts.

10.3 Produits de décomposition dangereux
Voir point 5.3

11. Informations toxicologiques

11.1 Toxicité aiguë et effets immédiats

Ingestion, LD50 Rat oral (mg/kg):	> 5000, Substance actif
Inhalation, LC50 Rat inhalation (mg/l/4h):	n.v.
Contact avec la peau, LD50 Rat dermal (mg/kg):	k.D.v., Voir point 15.
Contact avec les yeux:	n.v.

11.2 Effets retardés et chroniques

Sensibilisation:	k.D.v.
Effets cancérogènes:	Non, (NTP, IARC, OSHA)
Effets mutagènes:	k.D.v.
Effets tératogènes:	k.D.v.
Effets narcotiques:	k.D.v.

11.3 Autres indications
Classification selon la procédure de calcul.
Peuvent apparaître:
Irritation des yeux.
Inhalation:
Maux de tête

Nausée
Vertige
Irritation des voies respiratoires.
Influence sur/Endommagement du système nerveux central.
En cas de contact de longue durée:
Dermatite (inflammation de la peau)
Ingestion:
Nausée
Vomissement
Diarrhée
Danger d'aspiration.

12. Informations écologiques

Catégorie de danger pour l'eau (Allemagne):	1
Auto-évaluation:	Oui (VwVwS)
Persistance et dégradabilité:	
Facilement biodégradable (84%/28d)	
Comportement dans les installations de traitement d'eaux usées:	En cas d'utilisation correcte des pertubations ne sont pas à craindre.
Toxicité aquatique:	
Toxicité pour les poissons:	
LC50 > 100 mg/l/96h *	
Ecotoxicité:	n.v.

* Naphta lourd (pétrole), hydrotraité

13. Considérations relatives à l'élimination

13.1 Pour la substance / préparation / résidus

Numéro de la clé de déchets CE:
Les codes déchets indiqués ci-dessous sont cités à titre indicatif, et se basent sur l'utilisation prévue pour ce produit. En cas d'utilisation spéciale et dans le cadre des possibilités d'élimination des déchets de la part de l'utilisateur, d'autres codes déchets peuvent éventuellement être assignés aux produits.
16 05 04 gaz en récipients à pression (y compris les halons) contenant des substances dangereuses
Numéro de la clé de déchets Autriche: 55373
Recommandation:
Respecter les prescriptions administratives locales
Par exemple, installation d'incinération appropriée.

13.2 concernant les emballages contaminés

Voir point 13.1
Respecter les prescriptions administratives locales
15 01 04 emballages métalliques
15 01 01 emballages en papier/carton
Eliminer via "Duales System".

14. Informations relatives au transport

Informations générales

Numéro NU: 1950

Transport routier / transport ferroviaire (ADR/RID)

Classe/groupe d'emballage: 2/-
UN 1950 AÉROSOLS
Code de classification: 5F
LQ: 2

Transport par navire de mer

IMDG-Code: 2/- (classe/groupe d'emballage)
EmS: F-D, S-U
Polluant marin / Marine Pollutant: n.a.
AEROSOLS

Transport aérien

IATA: 2.1/-/- (classe/danger secondaire/groupe d'emballage)
Aerosols, flammable

Indications supplémentaires:

Les dispositions relatives aux quantités minimum ne sont pas respectées ici.

Le numéro d'identification du danger ainsi que la codification de l'emballage sont disponibles sur demande

15. Informations réglementaires

Marquage selon le règlement sur les substances dangereuses incl. les directives de la CE (67/548/CEE et 1999/45/CE)

Symboles: --
Indications de danger: --

Les phrases R:
10 Inflammable.
66 L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.

Les phrases S:
2 Conserver hors de la portée des enfants.
23.c Ne pas respirer les aérosols.
24 Éviter le contact avec la peau.
46 En cas d'ingestion, consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
51 Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
56 Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
Suppléments:
Récipient sous pression. A protéger contre les rayons solaires et à ne pas exposer à une température supérieure à 50°C.
Ne pas percer ou brûler même après usage.
Ne pas vaporiser vers une flamme ou un corps incandescent.
Conserver à l'écart de toute source d'ignition - Ne pas fumer.
Conserver hors de la portée des enfants.
Respecter les limitations: Oui
Observer la loi sur la protection des jeunes travailleurs (prescription allemande).
VOC ~ 80%
MAK/BAT:
Voir point 8.
Respecter l'ordonnance sur les produits chimiques, OChim.
Respecter l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim.

16. Autres informations

Ces indications se rapportent au produit prêt à être livré
Classe de stockage de la VCI (règlement d'Allemand): 2 B
Points revisés: 1
Les phrases suivantes représentent les phrases R en toutes lettres des ingrédients (cités sous le numéro 2).
10 Inflammable.
65 Également nocif: peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
66 L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.

Légendes:

n.a. = n'est pas applicable / n.v., k.D.v. = n'est pas disponible / n.g. = n'est pas examiné
VME = Valeurs limites de moyenne d'exposition (France) / VLE = Valeurs limites d'exposition à court terme (France)
TLV-ACGIH = Threshold Limit Value of the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Etats-Unis) / AG = "Arbeitsplatzgrenzwert" (Allemagne)
IBE = Indicateurs biologiques d'exposition (France) / ACGIH-BEI = Biological Exposure Indices of the ACGIH (Etats-Unis) / BG = "Biologischer Grenzwert" (Allemagne)
VbF = Règlement sur les liquides combustibles (Autriche)
WGK = Cat. du danger pour l'eau (Allemagne) - WGK 3 = Comporte un danger élevé, WGK 2 = Comporte un danger, WGK 1 = Comporte un faible danger pour l'eau. VwVwS = Consignes administratives pour les substances présentant un danger pour l'eau (Allemagne)
VOC = Volatile organic compounds (composants org. volatils (COV)) / AOX = composés halogénés org. adsorbables

Les indications faites ci-dessus doivent indiquer le produit considérant les dispositions de sécurité nécessaires,elles ne servent pas à garantir certaines qualités et se basent sur nos connaissances actuelles.
Toute responsabilité est exclue.
Elaboré par:
Chemical Check GmbH, Beim Staumberge 3, D-32839 Steinheim, Tél.: 01805-CHEMICAL / 01805-243 642, Fax: 05233-941790
© by Chemical Check GmbH Gefahrstoffberatung. Toute modification ou reproduction de ce document nécessite l'autorisation expresse de l'entreprise Chemical Check GmbH Gefahrstoffberatung.

A21 – LEXIQUES : ABREVIATIONS ET TERMES TECHNIQUES

LEXIQUE

Acrodynie : maladie infantile rare (jusqu'à l'âge de huit ans). Elle peut-être causée par un virus ou une intoxication au mercure. http://fr.wikipedia.org/wiki/Acrodynie

Anodes : électrode où a lieu une réaction électrochimique d'oxydation (menant à la production d'électrons) par opposition à la cathode où se produit une réaction électrochimique de réduction (menant à la consommation d'électrons). http://fr.wikipedia.org/wiki/Anode

Antifouling : revêtement ayant la propriété de s'opposer au développement d'organismes vivants sur les surfaces immergées. http://www.culture.gouv.fr/culture/dglf/cogeter/22-10-04-transport.htm

Chaleur latente : quantité de chaleur nécessaire à l'unité de masse d'un corps pour qu'il change d'état à température et pression constantes.
(http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1313)

Cathode : électrode siège d'une réduction, que l'on qualifie alors de réduction cathodique. Elle correspond à la borne positive (+) dans une pile électrique qui débite et à la borne négative du générateur extérieur dans le cas d'un électrolyseur (l'électrolyse peut être vu comme la réaction inverse de celle qui se produit naturellement dans une pile, d'où l'inversion des polarités). http://fr.wikipedia.org/wiki/Cathode

Champ électrostatique : dans le cadre de l'électromagnétisme, le champ électrique est un objet physique qui permet de mesurer en tout point de l'espace l'influence exercée à distance par des particules chargées électriquement. http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_%C3%A9lectrique

Clepsydres : le mot « clepsydre » désignait une machine qui indiquait l'heure par le moyen de l'écoulement de l'eau. Les clepsydres, ou horloges à eau, si usitées pendant l'Antiquité ont été entièrement abolies par l'apparition de techniques plus modernes (horloges à roues, etc…). http://www.ac-orleans-tours.fr/lettres/coin_eleve/etymon/phys/Clepsy2.htm

Chaleur spécifique : taux de variation de l'énergie interne spécifique avec la température : pour une variation de température à volume constant, ou taux de variation de l'enthalpie spécifique avec la température : pour une variation à pression constante.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Chaleur_sp%C3%A9cifique

Densité de vapeur : donnée indiquant le nombre de fois que les vapeurs d'un produit sont plus lourdes ou plus légères que l'air (air = 1). Cette mesure est prise au point d'ébullition. http://www.reptox.csst.qc.ca/Lexique-A.htm

Eau régale : l'eau régale, ou eau royale, a été découverte au IXe siècle par l'alchimiste *Jabir ibn Hayyan*. De couleur jaunâtre, elle était alors réputée pour avoir la faculté de dissoudre des métaux

comme l'or. L'eau régale est obtenue en faisant réagir une mole d'acide nitrique avec trois moles d'acide chlorhydrique, une réaction dont l'équation s'écrit :

$$HNO_3 + 3\ HCl \rightarrow NOCl + 2\ Cl + 2\ H_20$$

http://www.futura-sciences.com/comprendre/g/definition-eau-regale_4489.php

Hexagonal : système cristallin dont la maille élémentaire est un prisme droit à base losange. La combinaison de trois de ces mailles forme un prisme hexagonal. Ce système comporte 2 axes cristallographiques égaux (a = b) formant entre eux un angle de 120 degrés, le troisième axe, c, est perpendiculaire au plan formé par a et b (alpha = beta = 90 degrés). L'élément caractéristique du système est un axe de symétrie d'ordre 6: A6. Ce système comporte 5 classes cristallines. http://www.futura-sciences.com/comprendre/g/definition-hexagonal-systeme_1513.php

Ionisation : action qui consiste à enlever un ou plusieurs électrons à la structure atomique. L'atome, en perdant une partie de ses charges négatives, n'est plus neutre électriquement. Il est alors appelé ion. http://fr.wikipedia.org/wiki/Ionisation

Liaisons covalentes : liaison entre deux atomes résultant de la mise en commun de deux électrons provenant séparément de chacun d'eux.
http://www.futura-sciences.com/comprendre/g/definition-liaison-covalente_4089.php

Rhomboédrique : système cristallin qui peut être décrit de deux façons. Soit on décrit sa maille élémentaire comme un rhomboèdre dont les six faces sont des losanges égaux ; donc a = b = c et alpha= beta = gamma 90 deg., soit on le décrit comme le système hexagonal (a = b c, et alpha = beta = 90 deg., gamma = 120 deg.). Cette seconde façon est maintenant préférée pour la présentation des paramètres cristallographiques des minéraux.
http://www.futura-sciences.com/comprendre/g/definition-rhomboedrique-systeme_1605.php

Résistance : conducteur ohmique est le quotient de la tension U entre ses bornes par l'intensité du courant I qui le traverse : R = U/I.
http://www.futura-sciences.com/comprendre/g/definition-resistance-electrique_364.php

Relais : un relais électromécanique est un organe très commun en électrotechnique, il est chargé de transmettre un ordre entre la partie commande et la partie puissance d'un appareil électrique. http://fr.wikipedia.org/wiki/Relais_%C3%A9lectrom%C3%A9canique

Triphasés : système de trois tensions sinusoïdales de même fréquence qui sont déphasées entre elles (de 120 ° ou 2 Π / 3 radians dans le cas idéal). Si la fréquence est de 50 Hz par exemple, alors les trois phases sont retardées de (1/50)/3 seconde [soit 6,7 millisecondes]. Lorsque les trois

conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace, le système est dit équilibré. http://fr.wikipedia.org/wiki/Triphas%C3%A9

Sphères armillaires : en astronomie, une sphère armillaire, aussi connue sous le nom d'*astrolabe sphérique*, est un modèle de la sphère céleste utilisé pour montrer le mouvement des étoiles autour de la Terre ou du Soleil. (http://fr.wikipedia.org/wiki/Sph%C3%A8re_armillaire)

Température critique : la température critique d'une substance est la température au-delà de laquelle une phase liquide ne peut pas exister, quelle que soit la pression. http://www.futura-sciences.com/comprendre/g/definition-temperature-critique_1985.php

Tension électrique : différence de potentiel électrique (DDP) entre deux points d'un circuit électrique. Le symbole normalisé d'une tension est **U**. L'unité de mesure en est le volt ou V. Dans les schémas électrique on se sert de la lettre **V** associé à d'autres symboles pour désigner les différents potentiels.

http://www.techno-science.net/index.php?onglet=glossaire&definition=3219

Tension superficielle : force d'un liquide. La surface agit comme une membrane élastique tendant à contracter la surface au maximum. On l'exprime en dynes/cm^2.
http://www.recy.net/frame.php?url=http://www.recy.net/dicoeco.php?mode=alpha&terme=VGVuc2lvbiBzdXBlcmZpY2llbGxl

Tension de vapeur : lorsqu'un produit s'évapore, ses vapeurs exercent une pression dans le milieu ambiant. La tension de vapeur s'exprime en millimètres de mercure (mm de Hg) ou en kilopascal (kPa) et se calcule à 20°C sous une pression atmosphérique normale de 760 mm de Hg (101,32 kPa). Une tension de vapeur supérieure à 760 mm de Hg (101,32 kPa) indique que le produit est à l'état gazeux. Plus la tension de vapeur d'un produit est élevée, plus il a tendance à s'évaporer. http://www.reptox.csst.qc.ca/Lexique-A.htm

Transformateur : convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique

LEXIQUE DES ABREVIATIONS

ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists

CCE : Commission des Communautés Européennes

CCHST : Centre canadien de l'hygiène et de la sécurité au travail

CPG : Chromatographie en phase gazeuse

CTQ : Centre de Toxicologie du Quebec

DEQ : Department of Environmental Quality

EPA : Environmental Protection Agency

IDEM : Indiana Department of Environmental Management

ILO : The International Labour Organisation

IPCS : International Program on Chemical Safety

IPCS INCHEM : Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations

INSPQ : Institut national de la santé publique du Québec

NEWMOA : The Northeast Waste Management Officials' Association

NIOSH : The National Institute for Occupational Safety and Health

OIT : Organisation internationale du travail

OSHA : Occupational Safety & Health Administration

SAA : Spectrométrie d'absorption atomique

SFA : Spectroscopie de fluorescence atomique

UNEP : The United Nation Environment Program

WHO : The World Health Organization