POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Interactions et dégradation des conducteurs électriques en milieu d'incendie
Auteur: Author:	Isabelle Murray
Date:	2006
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Murray, I. (2006). Interactions et dégradation des conducteurs électriques en milieu d'incendie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7855/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/7855/
Directeurs de recherche: Advisors:	Frank Ajersch
Programme: Program:	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTERACTIONS ET DÉGRADATION DES CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES EN MILIEU D'INCENDIE

ISABELLE MURRAY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉTALLURGIQUE)
DÉCEMBRE 2006

© Isabelle Murray, 2006

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-25563-6
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-25563-6

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

INTERACTIONS ET DÉGRADATION DES CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES EN MILIEU D'INCENDIE

présenté par : MURRAY Isabelle

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SAVADOGO Oumarou, Doct. d'état, président

M. AJERSCH Frank, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. COULOMBE Ronald, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Il est certain qu'une telle caractérisation des signes observés aux conducteurs électriques suite à un incendie constitue une approche métallurgique permettant d'interpréter le comportement d'un incendie, et ne saurait être possible sans les conseils de mes collègues en recherche de causes d'incendies qui ont accepté de lire différentes versions des chapitres de ce mémoire pour me faire bénéficier de leurs connaissances et de leurs suggestions, et m'éviter ainsi nombre d'erreurs. Je tiens donc à remercier particulièrement Jean-François Joubert et Claude Létourneau pour leurs judicieux conseils dans la rédaction de ce mémoire, ainsi que tous les membres de l'équipe feu dont notamment notre chef de groupe Claude Lefrançois pour leur aide technique. Je suis ainsi redevable à mon employeur EXPERTS-CONSEILS CEP INC pour m'avoir encouragée et supportée ces trois années où j'ai eu à délaisser quelque peu l'enquête incendie sur le terrain pour assister à mes cours et préparer ce mémoire.

Un remerciement tout spécial s'adresse à Frank Ajersch de l'école Polytechnique pour m'avoir offert de son temps et de ses connaissances en agissant comme directeur de recherche et pour avoir lu l'ensemble des chapitres et fait de nombreuses suggestions.

Je tiens finalement à remercier mon conjoint ingénieur Dominic Chalifoux pour son appui et ses conseils.

RÉSUMÉ

Les conducteurs électriques des bâtiments se retrouvent fréquemment, suite à des incendies, endommagés en surface. En fait, ils présentent des régions particulières où le métal a été physiquement affecté, occasionnant par conséquent des changements morphologiques par rapport à l'état initial. L'examen desdits dommages peut révéler des éléments et indices objectifs susceptibles de permettre aux investigateurs de localiser la région d'origine et de déterminer la cause de ces incendies. Il est cependant très facile de se méprendre et d'interpréter de façon erronée la véritable signification de ces éléments objectifs, conduisant donc à de fausses conclusions.

Ce mémoire présente donc, dans un premier temps, l'ensemble des travaux qui ont traité de ce sujet pour en dévoiler les principales forces et faiblesses. En fait, il ressort de cette revue de littérature que la caractérisation des divers endommagements a surtout été réalisée de façon visuelle. Par conséquent, une approche scientifique basée sur la métallurgie combinant des analyses macroscopiques et microscopiques a été retenue afin d'identifier les signes caractéristiques servant de guides dans la détermination de la nature des dommages en surface des conducteurs. Cette approche permet, par le fait même, de tirer des informations fondamentales menant à la détermination de la région d'origine et de la cause d'un incendie.

Dans un second temps, les divers paramètres de la sélection des échantillons ont été mis en place afin de considérer un échantillonnage représentatif de l'ensemble des conducteurs retrouvés dans des milieux incendiés. Pour ce faire, des conducteurs en-

dommagés thermiquement et par court-circuit en laboratoire ont été considérés, de même que d'autres conducteurs recueillis sur des scènes d'incendie.

Grâce aux analyses et examens détaillés, il a été possible de révéler l'ensemble des caractéristiques propres à des endommagements de nature thermique et électrique. Par le fait même, les différents éléments objectifs et traits distinctifs identifiés sur les conducteurs métalliques ont permis de relier la cause de ces dommages aux activités électriques pouvant être considérées comme cause possible des incendies, ou à la température du milieu, phénomène purement thermique. Des calculs d'énergie de court-circuit ont finalement permis de valider et de lier ce paramètre aux pertes de masses des conducteurs associées à ce phénomène. Les réactions entre des métaux dissemblables ont également été caractérisées afin d'identifier les endommagements propres à l'interaction de ceux-ci, lesquels peuvent souvent être interprétés de façon erronée.

ABSTRACT

The examination of electrical wiring following a fire often shows surface damage. This damage can occur in particular regions in the form of notches and beads as well as total surface degradation that are physically different from the initial wire condition. The examination of this damage can help the fire investigator to interpret the physical or chemical changes which are related to the origin and cause of the fire. However, misinterpretation of the nature of this damage is quite commun, leading to false conclusion.

This document presents a review of the previous research related to this subject and summarizes the main strengths and weaknesses of these studies. The review shows that the characterization of the damage to conducting wires had mostly been done by visual examination only. This study uses a metallurgical approach to identify signs which are guidelines for the characterization of the type of damage that occurs. This approach reveals scientific information leading to the determination of the origin and cause of a fire.

Samples of conducting wires were selected to take with account the numerous parameters which are representative of all the different wiring systems that can be involved in a fire. Conductors damaged in an actual fire were compared to the results of damage by exposure to a flame or by short-circuit in specifically controlled laboratory experiments.

Scanning electron microscopy, X-ray analysis and optical microscopy, together with macroscopic examination and metallographic preparation, were used in order to study the damage to conductors at electrical fire initiation and to exposure of intense heat. Reactions between different metals have also been studied to reveal characteristics typical of this kind of interaction. An experimental technique was developed to calculate the energy of a short-circuit. The mass loss of the metallic conductors associated with this phenomenon caused by evaporation is compared to the energy dissipated. The examination and analysis of each case resulted in the ability to distinguish damage related to the thermal effect from that caused by a short-circuit.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **IV**
RÉSUMÉ ..... **V**
ABSTRACT ..... **VII**
TABLE DES MATIÈRES ..... **IX**
LISTE DES FIGURES ..... **XIV**
LISTE DES TABLEAUX ..... **XXV**
LISTE DES GRAPHIQUES ..... **XXVI**
CHAPITRE 1: INTRODUCTION **1**
1.1 PROBLÉMATIQUE 2
1.2 BUT ET OBJECTIFS DU PROJET 3
1.3 MILIEU GÉNÉRÉ PAR UN INCENDIE 4
1.3.1 Environnement gazeux d'un incendie *6*
1.4 ÉTAPES GÉNÉRALES DU PROJET 9
1.4.1 Le conditionnement des échantillons *10*
1.4.2 Calculs des énergies de court-circuit *10*
1.4.3 L'étude macroscopique *10*
1.4.4 L'analyse microscopique *11*
CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE **12**
2.1 CARACTÉRISTIQUES MÉTALLURGIQUES DES PRINCIPAUX MÉTAUX 12
2.1.1 Aluminium *13*
2.1.2 Cuivre *17*
2.1.3 Laiton *18*
2.1.4 Acier *20*
2.2 PARAMÈTRES DES ARCS ÉLECTRIQUES ET DES COURTS-CIRCUITS 20

2.2.1 Phénomène physique *21*
2.2.1.1 Court-circuit franc 21
2.2.1.2 Court-circuit arquant 23
2.2.2 Arc électrique *24*
2.2.3 Relation court-circuit/arc électrique et incendie *25*
2.2.4 Paramètres électriques des arcs *27*
2.3 ANALYSE DES COMPOSANTS ÉLECTRIQUES 27
2.3.1 Dommages par arcs électriques (court-circuit) *29*
2.3.2 Dommages thermiques *39*
2.3.3 Endommagements mécaniques *44*
2.3.4 Formation d'intermétalliques *45*
2.3.5 Résumé de la revue de littérature *50*
2.4 MATÉRIAUX ISOLANTS 52
CHAPITRE 3: ASPECTS THÉORIQUES 55
3.1 PHÉNOMÈNE D'INCENDIE 55
3.1.1 Principes thermodynamiques appliqués à un incendie *56*
3.1.2 Transfert de chaleur lors d'un incendie *57*
3.1.2.1 Conduction 58
3.1.2.2 Convection 59
3.1.2.3 Rayonnement 60
3.1.2.4 Températures à proximité des flammes d'un incendie 61
3.1.3 Interactions composants métalliques et incendie *65*
3.2 OXYDATION DES MÉTAUX 70
3.1.4 Oxydes de fer *71*
3.1.5 Oxyde d'aluminium *73*
3.1.6 Oxydes de cuivre *74*
3.1.7 Oxydation du laiton *79*
CHAPITRE 4: EXPÉRIMENTAL 82

4.1 ENDOMMAGEMENT THERMIQUE 83
4.1.1 Endommagements thermiques en laboratoire 84
4.1.2 Endommagements thermiques lors d'un incendie 87
4.2 ENDOMMAGEMENTS PAR COURT-CIRCUIT 90
4.2.1 Endommagements par court-circuit en laboratoire 90
4.2.2 Endommagements par court-circuit en milieu d'incendie 95
4.3 EXAMEN MACROSCOPIQUE 95
4.4 EXAMEN MICROSCOPIQUE 96
4.4.1 Métallographies 96
4.4.2 Examen au microscope électronique à balayage 96
4.5 CALCULS DES ÉNERGIES DE COURTS-CIRCUITS 97

CHAPITRE 5: RÉSULTATS 99

5.1 ENDOMMAGEMENTS THERMIQUES 99
5.1.1 Fusion du cuivre solide 100
5.1.1.1 Examens macroscopiques et microscopiques 101
5.1.1.2 Analyses de composition de surface des endommagements par EDS et microstructures des sections 109
5.1.2 Fusion du cuivre multibrins 116
5.1.2.1 Examens macroscopique et microscopique 116
5.1.2.2 Analyses de composition de surface des endommagements par EDS et microstructures des sections 122
5.1.3 Fusion de l'aluminium 124
5.1.3.1 Examens macroscopiques et microscopiques 125
5.1.3.2 Analyse de composition chimique par EDS et microstructures des sections 130
5.1.4 Fusion du cuivre et de l'aluminium 133
5.1.4.1 Examens macroscopiques et microscopiques 134
5.1.4.2 Analyse de composition par EDS et analyse microstructurale 141
5.1.5 Fusion de l'acier et de l'aluminium 145

5.1.5.1 Examens macroscopiques et microscopiques 146
5.1.5.2 Analyses de composition de surface par EDS et microstructures des sections 150
5.1.6 Fusion du laiton et de l'étain 159
5.1.6.1 Examens macroscopiques et microscopiques 160
5.1.6.2 Analyses de composition chimique par EDS et microstructures des sections 163
5.2 RÉSULTATS DES ARCS ÉLECTRIQUES ET COURTS-CIRCUITS 169
5.2.1 Courts-circuits sur des conducteurs de cuivre solides (cuivre-cuivre). 169
5.2.1.1 Examens macroscopiques et microscopiques 170
5.2.1.2 Analyses de composition chimique par EDS et microstructures des sections 177
5.2.1.3 Énergie et paramètres électriques associés aux courts-circuits 182
5.2.2 Courts-circuits cuivre multibrins 189
5.2.2.1 Examens macroscopiques et microscopiques 189
5.2.2.2 Analyse de composition par EDS 195
5.2.3 Courts-circuits aluminium-aluminium 196
5.2.3.1 Examens macroscopiques et microscopiques 196
5.2.3.2 Analyses de composition par EDS 199
5.2.3.3 Énergie et paramètres électriques associés aux courts-circuits 200
5.2.4 Courts-circuits acier-aluminium 202
5.2.4.1 Examens macroscopiques et microscopiques 202
5.2.4.2 Analyses de composition chimique par EDS et microstructures des sections 205
5.2.5 Courts-circuits laiton-étain 212
5.2.5.1 Examens macroscopiques et microscopiques 212
5.2.5.2 Analyse de composition par EDS et microstructures des sections ... 214

CHAPITRE 6 : DISCUSSION DES RÉSULTATS 218

6.1 ENDOMMAGEMENTS PUREMENT THERMIQUES 219

6.1.1 Phénomènes associés avec les endommagements thermiques *219*

6.1.2 Résultats des endommagements thermiques *223*

6.2 ARCS ÉLECTRIQUES 226

6.2.1 Phénomènes associés aux arcs électriques et courts-circuits *227*

6.2.2 Résultats des arcs électriques et courts-circuits *227*

6.2.3 Paramètres électriques et pertes de masse associés aux courts-circuits *229*

6.3 COMPARAISON DES DOMMAGES DE NATURE THERMIQUE AVEC CEUX DE NATURE ÉLECTRIQUES 231

CHAPITRE 7: CONCLUSION **232**

CHAPITRE 8 : RECOMMANDATIONS **238**

BIBLIOGRAPHIE **240**

ANNEXE 1 ..... **245**

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Répartition des incendies selon la cause probable, Québec, 1992 à 2002, ministère de la Sécurité publique du Québec 1

Figure 1.2 : Développement thermique idéal d'un incendie issu du guide NFPA 921 5

Figure 1.3 : Inflammabilité pour le mélange méthane/oxygène/azote, extrait du livre « *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* » 7

Figure 2.1 : Câble d'aluminium endommagé suite à la corrosion par l'eau, CCBDA, 1997 15

Figure 2.2 : Diagramme d'équilibre cuivre-zinc, SGTE collection (2006) 19

Figure 2.3 : Contact entre deux conducteurs pour court-circuit franc 22

Figure 2.4 : Résultats de courts-circuits francs sur des conducteurs de cuivre, Béland (2005) 22

Figure 2.5 : Contact entre deux conducteurs dans le cas d'un court-circuit Arquant 23

Figure 2.6 : Dommages laissés par un court-circuit arquant, Myers (2002) 24

Figure 2.7 : Trois régions distinctes de l'arc électrique 25

Figure 2.8 : Températures d'un arc électrique en fonction du courant de l'arc (Babrauskas 2004) 30

Figure 2.9 : Dommages sur un conducteur de cuivre faits par un arc électrique créé par un incendie (Babrauskas 2004) 30

Figure 2.10 : Dommages sphériques laissées par des arc électriques sur des conducteurs de cuivre (Ettling 1978) 31

Figure 2.11 : Coupes de sections globulaires sur des conducteurs de cuivre occasionnées lors de circonstances diverses. (a) Arc électrique à l'atmosphère. (b) Arc électrique par une flamme. (c) Court-circuit à l'atmosphère. (d) Court-circuit par une flamme

(Erlandsson et Strand 1983) 32

Figure 2.12 : Traces laissées par un court-circuit ayant sectionné des conducteurs multibrins de cuivre (NFPA 921, 2004) 34

Figure 2.13 : Endommagement thermique ayant sectionné un conducteur (NFPA 921, 2004) 34

Figure 2.14 : Morphologie d'un brin de cuivre fondu par l'effet d'un court-circuit (Howitt 1998) 35

Figure 2.15 : Cratère et dépôt générés par un arc électrique localisé entre deux conducteurs de cuivre (NFPA 921, 2004) 36

Figure 2.16 : Globules faits par un court-circuit sur plusieurs brins d'un conducteur de cuivre (NFPA 9921,2004) 37

Figure 2.17 : Conducteurs de cuivre oxydés montrant un endommagement thermique (Babrauskas 2004) 40

Figure 2.18 : Conducteurs de cuivre fusionnés (NFPA 921,2004) 40

Figure 2.19 : Microstructures d'un conducteur de cuivre portant une trace de court-circuit (haut) et un endommagement thermique (bas) selon Shaw (1965) 42

Figure 2.20 : Différents exemples d'endommagements thermiques sur des conducteurs de cuivre (DeHaan 2002) 43

Figure 2.21 : Sectionnement d'un conducteur de cuivre avec une pince (Sanderson 1997) 44

Figure 2.22 : Endommagements liés à un connecteur (Sanderson 1997) 45

Figure 2.23 : Dissolution d'un conducteur de cuivre par l'aluminium (Béland, 1983) 46

Figure 2.24 : Dissolution et sectionnement de brins de cuivre par de l'aluminium (Fuchs, 1997) 47

Figure 2.25 : Diagramme d'équilibre cuivre-aluminium, (SGTE collection) 48

Figure 2.26 : Destruction partielle d'une grille d'acier par de l'aluminium en fusion (Fuchs 1997) 49

Figure 2.27 : Diagramme d'équilibre fer-aluminium 50

Figure 2.28 : Effets d'une température de préchauffage sur l'allumage du PVC par une tension de 100Volts appliquée à 1mm de séparation, Babrauskas (2005) 54

Figure 3.1: Tétraèdre du feu issu du guide NFPA 921 56

Figure 3.2 : Principes de propagation d'un incendie selon Quintiere (1998) 58

Figure 3.3 : Conduction au travers d'un mur selon Quintiere (1998) 58

Figure 3.4 :Distribution de températures des flammes, Quntiere (1998) 62

Figure 3.5 : Compositions et épaisseurs des oxydes de fer sur le métal (Kofstad 2000) 71

Figure 3.6 : Diagramme de phase fer-oxygène (Kofstad 2000) 72

Figure 3.7 : Variation de la constante parabolique du cuivre en fonction de la pression partielle d'oxygène et de la température (Birks et Meier 1983) 74

Figure 3.8 : Diagramme d'équilibre cuivre-oxygène, SFPE 2000 76

Figure 3.9 : Diagramme d'équilibre cuivre-oxygène (Des Matériaux 1986) 77

Figure 3.10 : Croissance des couches d'oxydes de cuivre (Birks et Meier 1983) 79

Figure 3.11 : Oxydation interrompue après 1 heure (Kofstad 2000) 80

Figure 4.1 : Schéma du montage des endommagements thermiques 85

Figure 4.2 : Montage de l'évaluation des dommages thermiques fait aux laboratoires de Experts-Conseils CEP inc (2003) 86

Figure 4.3 : Initiation d'un incendie dans une causeuse par Experts-Conseils CEP inc. (2003) 87

Figure 4.4 : État de l'incendie avant son extinction, mise à feu de Experts-Conseils CEP (2003) 88

Figure 4.5 : Schéma du montage pour l'acquisition de données lors des

courts-circuits 91

Figure 4.6 : Appareil *Fluke* pour l'enregistrement des données des circuits, lors du montage chex Experts-Conseils CEP (2005) 92

Figure 4.7 : Panneau de contrôle pour les paramètres électriques, Experts-Conseils CEP (2005) 93

Figure 4.8 : Montage des sections de conducteurs, Experts-Conseils CEP (2005) 93

Figure 5.1 : Dommages thermiques sur des conducteurs de cuivre (a) créés en laboratoire chez Experts-Conseils CEP (2003) et (b) récupérés sur une scène d'incendie (2003) 102

Figure 5.2 : Présence d'oxydes (surface rugueuse) sur un conducteur de cuivre endommagé thermiquement suite à un incendie (2003) 102

Figure 5.3 :Dommages engendrés par la chaleur sur un câble de cuivre prélevé sur un site d'incendie, 2002 104

Figure 5.4 : Surface du conducteur de cuivre (a) fusionnée suite à la chaleur avec influence de la gravité et (b) présence d'oxydes de cuivre sur (a) 104

Figure 5.5 : Dommages thermiques ayant sectionné des conducteurs de cuivre, créés en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2004) 105

Figure 5.6 : Fusion thermique des conducteurs d'un câble de cuivre récupéré sur une scène d'incendie (2003) 105

Figure 5.7 : Extrémité sectionnée d'un câble de cuivre récupéré sur une scène d'incendie (2004) 106

Figure 5.8 : Extrémité d'un conducteur de cuivre fusionné thermiquement, dont la fusion a été influencée par la gravité 106

Figure 5.9 : Endommagement par fusion sur un conducteur de cuivre et présence d'oxydes, Experts-Conseils CEP (2004) 108

Figure 5.10 : Structure dendritique des oxydes en surface d'un conducteur de cuivre 108

Figure 5.11 : Structure dendritique des oxydes en surface d'un conducteur de cuivre soumis à un milieu d'incendie, ayant fusionné par la chaleur et solidifié par la suite (2003) 109

Figure 5.12 : Microstructure d'un conducteur de cuivre affecté thermiquement, Experts-Conseils CEP (2005) 111

Figure 5.13 : Microstructure d'un conducteur de cuivre prélevé sur une scène d'incendie, 2004 112

Figure 5.14 : Structure dendritique, conducteur de cuivre affecté par la chaleur et prélevé sur un site d'incendie (2003) 113

Figure 5.15 : Microstructure transversale d'un conducteur de cuivre soumis à la chaleur et prélevé sur un incendie (2004) 114

Figure 5.16 : Vue à fort grossissement de la surface du conducteur de cuivre fusionné par la chaleur et indication de l'analyse linéaire 115

Figure 5.17 : Endommagement thermique fait en laboratoire d'un cordon impliquant plusieurs conducteurs multibrins de cuivre, Experts-Conseils CEP (2005) 117

Figure 5.18 : Agglomération de brins de cuivre d'un conducteur multibrins liée à des dommages thermiques faits par en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2005) 117

Figure 5.19 : Endommagement thermique de conducteurs multibrins de cuivre prélevés sur une scène d'incendie (2002) 118

Figure 5.20 : Masse agglomérée de divers brins de cuivre provenant de deux conducteurs multibrins fusionnés par la chaleur d'un incendie 119

Figure 5.21 : Dommage ponctuel par fusion thermique sur un seul conducteur multibrins de cuivre endommagé thermiquement en laboratoire (2004) 119

Figure 5.22 : Surface de la zone endommagée par fusion sur un conducteur multibrins de cuivre où les brins demeurent inidentifiables 119

Figure 5.23 : Dommages thermiques et oxydes en surface d'un conducteur de cuivre multibrins endommagé en laboratoire, Experts-Conseils CEP inc. (2005) 120

Figure 5.24 : Structures dendritiques d'oxydes en surface de la zone endommagée thermiquement sur un conducteur multibrins de cuivre 120

Figure 5.25 : Microstructure de la zone fusionnée et solidifiée suite à un endommagement thermique d'un conducteur de cuivre multibrins 122

Figure 5.26 : Globule de cuivre fait par fusion thermique et provenant d'un conducteur multibrins vu au microscope électronique à balayage, 1.8K, en électrons rétrodiffusés 123

Figure 5.27 : Fusion thermique de l'aluminium prélevé sur une scène d'incendie (2006) 125

Figure 5.28 : Extrémité fondue par la chaleur, conducteur d'aluminium prélevé sur un site d'incendie en 2005 126

Figure 5.29 : Surface fondue d'un conducteur d'aluminium montrant des particules d'oxydes et des craquelures 126

Figure 5.30 : Globule lié à un endommagement thermique créé en laboratoire sur un conducteur d'aluminium (2004) 129

Figure 5.31 : Fissures des oxydes en surface d'un conducteur d'aluminium fusionné thermiquement, 2005 129

Figure 5.32 : Structure dendritique d'un globule formé par un endommagement thermique sur un conducteur d'aluminium, Experts-Conseils CEP, 2004 131

Figure 5.33 : Fusion thermique de l'aluminium en périphérie de l'interface zone fusionnée et matériel d'enrobage 132

Figure 5.34 : Endommagements thermiques par alliage entre l'aluminium et le cuivre en surface d'un conducteur de cuivre récupéré d'une scène d'incendie 135

Figure 5.35 : Dépôt d'aluminium sur un conducteur de cuivre endommagé thermiquement, Experts-Conseils CEP (2003) 136

Figure 5.36 : Surface de l'aluminium et de l'oxyde d'aluminium déposé sur un conducteur de cuivre au microscope électronique à balayage 137

Figure 5.37 : Dépressions engendrées par l'interaction à haute température de l'aluminium sur un conducteur de cuivre (2002) 138

Figure 5.38 : Présence aluminium dans un cratère en surface d'un conducteur de cuivre 138

Figure 5.39 : Cratère engendré par la réaction de l'aluminium et du cuivre à 800°C, endommagement créé en laboratoire, Experts-Conseils CEP 2002 140

Figure 5.40 : Surface au fond du cratère (a) et au pourtour (a) caractérisée par la présence d'aluminium (intermétalliques) et d'oxydes sur un conducteur de cuivre 140

Figure 5.41 : Emplacement des analyses de composition EDS faites au MEB, 2000 sur un conducteur de cuivre affecté thermiquement par de l'aluminium 142

Figure 5.42 : Conducteur de cuivre endommagé thermiquement par de l'aluminium et dont les intermétalliques se sont détachés de la surface, MEB 25X 144

Figure 5.43 : Dépôts d'aluminium en surface de conducteurs occasionnés par des endommagements thermiques 146

Figure 5.44 : Agglomérations d'aluminium autour de conducteurs d'acier, 2004 147

Figure 5.45 : Légère dépression causée par les intermétalliques d'aluminium en surface d'un conducteur d'acier et dépôt d'aluminium, Experts-Conseils CEP 2004 148

Figure 5.46 : Aluminium, oxydes et intermétalliques sur un conducteur d'acier endommagé par la chaleur 149

Figure 5.47 : Dommages engendrés par la réaction thermique entre l'aluminium et l'acier (a) surface du brin d'acier et (b) zone affectée par l'aluminium 149

Figure 5.48 : Positionnement des régions pour analyses de composition de surface sur un conducteur d'acier endommagé avec de l'aluminium 151

Figure 5.49 : Conducteur d'acier recouvert d'aluminium et d'intermétalliques dont l'endommagement a été fait suite à un incendie 153

Figure 5.50 : Brins d'acier recouverts d'aluminium suite à un endommagement thermique, à 25X 153

Figure 5.51 : Microstructure centrale d'un brin d'acier ayant été endommagé par de l'aluminium, à 800X 154

Figure 5.52 : Zone d'interaction entre le fer et l'aluminium sur un conducteur d'acier endommagé thermiquement par l'aluminium 155

Figure 5.53 : Brin d'acier recouvert d'aluminium suite à leur interaction thermique(25X), Experts-Conseils CEP,2005 156

Figure 5.54 : Grains équiaxes et perlite résiduelle de la microstructure centrale du brin d'acier de la figure 5.54 d'un brin d'acier endommagé par de l'aluminium (800X) 157

Figure 5.55 : Microstructure transversale d'un brin d'acier affecté thermiquement par de l'aluminium dans un milieu d'incendie (25X) 158

Figure 5.56 : Grains selon l'axe transversal au centre d'un brin d'acier affecté par de l'aluminium et soumis à un incendie (500X) 158

Figure 5.57 : Endommagement thermique du laiton d'un contacteur par l'étain liquide, fait en laboratoire, Experts-Conseils CEP, 2004 160

Figure 5.58 : Surface d'une pièce de laiton endommagée thermiquement par de l'étain 160

Figure 5.59 : Endommagement thermique d'une pièce de laiton par l'étain, échantillon prélevé sur d'une scène d'incendie, 2004 162

Figure 5.60 : Fissures dans la zone des intermétalliques engendrée par l'étain sur une pièce de laiton 162

Figure 5.61 : Localisation des analyses de composition de surface sur une pièce de laiton affectée thermiquement par de l'étain, présentées aux graphiques 5.19 à 5.21 163

Figure 5.62 : Métallographie révélant une pièce de laiton affectée thermiquement par de l'étain, Experts-Conseils CEP, 2003 165

Figure 5.63 : Dépression créée par de l'étain en surface du laiton sans avoir laissé de couche d'étain, Experts-Conseils CEP, 2005 166

Figure 5.64 : Région d'analyse de 328µm dans la pièce de laiton endommagée thermiquement par de l'étain 167

Figure 5.65 : Région d'analyse de 421.1µm dans la pièce de laiton endommagée thermiquement par de l'étain 168

Figure 5.66 : Endommagement par court-circuit entre des conducteurs de cuivre faits en laboratoire, Experts-Conseils CEP, 2005 170

Figure 5.67 : Dommages ponctuels et localisés laissés par un court-circuit sur Un câble de cuivre solide 171

Figure 5.68 : Dommage ponctuel sur un conducteur de cuivre fait par court-circuit 171

Figure 5.69 : Sectionnement par court-circuit fait en laboratoire sur un câble de cuivre, Experts-Conseils CEP, 2005 172

Figure 5.70 : Sectionnement de deux conducteurs de cuivre suite à un court-circuit, échantillon prélevé sur une scène d'incendie, 2002 173

Figure 5.71 : Globules sur des conducteurs de cuivre occasionnés par un court-circuit, échantillon prélevé sur une scène d'incendie, 2002 174

Figure 5.72 : Endommagement généré par un court-circuit sur un conducteur de cuivre 175

Figure 5.73 : Vagues de solidification en surface d'un conducteur de cuivre à endommagé par court-circuit (a) sur un amoncellement et (b) dans une dépression 175

Figure 5.74 : Extrémité sectionnée par court-circuit d'un conducteur de cuivre montrant des vagues de solidification 176

Figure 5.75 : Surface lisse avec vagues de solidification et porosités sur la zone endommagée laissée par le court-circuit 176

Figure 5.76 : Région d'analyse de composition sur conducteur de cuivre portant un endommagement par court-circuit 178

Figure 5.77 : Endommagement par court-circuit sur un conducteur de cuivre 179

Figure 5.78 : Métallographie de la zone endommagée par court-circuit sur un conducteur de cuivre 179

Figure 5.79 : Globule et dépression occasionnés par un court-circuit sur un conducteur de cuivre 180

Figure 5.80 : Région d'analyse de 366.5μm dans un conducteur de cuivre endommagée par court-circuit 181

Figure 5.81 : Conducteurs multibrins de cuivre affectés par court-circuit et montrant des globules, échantillon prélevé sur un incendie, 2003 190

Figure 5.82 : Globules sphériques de fine taille créés par un court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre, Experts-Conseils CEP, 2005 191

Figure 5.83 : Court-circuit ayant sectionné un conducteur de cuivre multibrins et laissant des globules aux extrémités, Experts-Conseils CEP, 2005 191

Figure 5.84 : Globules ponctuels générés par un court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre, Experts-Conseils CEP, 2005 192

Figure 5.85 : Endommagements par court-circuit sur des conducteurs de cuivre multibrins laissant des surfaces lisses, Experts-Conseils CEP, 2005 192

Figure 5.86 : Vagues de solidification produites en surface d'une zone affectée par court-circuit sur un conducteur de cuivre multibrins endommagé en laboratoire 194

Figure 5.87 : Vagues de solidification produites en surface d'une zone affectée par court-circuit sur un conducteur de cuivre multibrins prélevé sur une scène d'incendie 194

Figure 5.88 : Dommages par court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre 195

Figure 5.89 : Endommagement par court-circuit sur un câble d'aluminium, Experts-Conseils CEP, 2005 196

Figure 5.90 : Zones affectées par un arc électrique sur des conducteurs d'aluminium, Experts-Conseils CEP, 2005 197

Figure 5.91 : Zone endommagée par un court-circuit et montrant des globules sur un conducteur d'aluminium 198

Figure 5.92 : Vagues de solidification sur un conducteur d'aluminium présentant une trace de court-circuit, Experts-Conseils CEP, 2005 198

Figure 5.93 : Région endommagée par court-circuit sur un câble d'aluminium avec zone ciblée pour analyse de composition 199

Figure 5.94 : Zone endommagée créée par un court-circuit entre de l'aluminium et un conducteur d'acier, échantillon prélevé sur un incendie (2003) 203

Figure 5.95 : Endommagement par court-circuit fait en laboratoire entre de l'aluminium et un brin d'acier 203

Figure 5.96 : Zone affectée par un court-circuit entre l'acier et l'aluminium 204

Figure 5.97 : Zone localisée d'endommagement créé par un court-circuit entre l'aluminium et un brin d'acier 205

Figure 5.98 : Régions où ont été faites les analyses de composition sur le conducteur d'acier 206

Figure 5.99 : Zone localisée affectée par un court-circuit entre l'aluminium et l'acier (25X) 208

Figure 5.100 : Région où les grains ont crû, entre l'aluminium et le reste de la zone affectée par le court-circuit sur le brin d'acier (250X) 209

Figure 5.101 : Affectation de la taille des grains à proximité du point de contact de l'arc électrique entre l'aluminium et l'acier 210

Figure 5.102 : Région d'analyse de 384,1μm dans une zone affectée par court-circuit entre l'aluminium et le fer 211

Figure 5.103 : Arc électrique entre une pièce d'étain et une autre de laiton, Experts-Conseils CEP, 2002 213

Figure 5.104 : Surface de la trace de court-circuit entre l'étain et le laiton montrant des vagues de solidification et un fini lisse 213

Figure 5.105 : Zones d'analyses de composition chimiques sur une pièce de laiton endommagée par court-circuit par de l'étain 214

Figure 5.106 : Microstructure d'une trace de court-circuit entre une pièce de laiton et une autre d'étain 216

Figure 5.106 : Région d'analyse de 370μm dans une zone affectée par court-circuit entre l'étain et le laiton 217

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Propriétés de certains gaz inflammables, NFPA 921 8

Tableau 2.1 : Comparaison des propriétés entre le cuivre et l'aluminium, Electrical Conductors Handbook, 1977 14

Tableau 2.2: Sommaire des dommages sur des conducteurs, NFPA 921 (2001) 51

Tableau 4.1 : Paramètres des essais d'endommagements thermiques et par courts-circuits 83

Tableau 5.1 : Paramètres et résultats des essais de court-circuit sur des conducteurs de cuivre, Experts-Conseils CEP, 2005 188

Tableau 5.2 : Paramètres et résultats des essais de court-circuit sur des Conducteurs d'aluminium, Experts-Conseils CEP, 2005 202

Tableau 6.1 : Caractéristiques des dommages thermiques et par courts-circuits 231

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 4.1 : Températures atteintes lors de la mise à feu #4 par Experts-Conseils CEP (2003) 89

Graphique 4.2 : Variation de l'intensité en fonction du temps lors d'un court-circuit 98

Graphique 5.1 : Analyses des éléments en surface d'un conducteur de cuivre endommagé par la chaleur par Experts-Conseils CEP (2003) 110

Graphique 5.2 : Analyse des éléments en surface d'un conducteur de cuivre endommagé par la chaleur suite à un incendie 110

Graphique 5.3 : Analyse linéaire de l'oxygène et du cuivre dans la zone de 110.6µm 115

Graphique 5.4 : Analyse linéaire de l'oxygène et du cuivre dans la zone de 455.4µm 123

Graphique 5.5 : Analyse en surface du conducteur de cuivre multibrins 124

Graphique 5.6 : Diagramme d'équilibre aluminium-oxygène, SGTE Collection (2006) 128

Graphique 5.7 : Analyse de composition en surface d'une zone endommagée thermiquement sur conducteur d'aluminium provenant d'un incendie 130

Graphique 5.8 : Analyse linéaire de l'oxygène et de l'aluminium dans la zone de 110.1µm 132

Graphique 5.9 : Diagramme de phases entre l'aluminium et le cuivre, SGTE Collection (2004) 134

Graphique 5.10 : Analyse de composition sur la surface d'un conducteur de cuivre, 2000 142

Graphique 5.11 : Analyse de composition sur la surface d'un conducteur de cuivre, près d'une région endommagée à l'aluminium 143

Graphique 5.12 : Analyse de composition dans la zone endommagée par la formation d'intermétalliques entre l'aluminium et le cuivre 143

Graphique 5.13 : Analyse de composition du conducteur de cuivre dans l'environnement de la zone endommagée par fusion par l'aluminium 144

Graphique 5.14 : Diagramme de phases fer-aluminium, SGTE Collection, 2005 145

Graphique 5.15: Analyse du brin d'acier, Experts-Conseils CEP, 2004 151

Graphique 5.16 : Analyse dans la zone endommagée sur le conducteur d'acier 152

Graphique 5.17 : Évolution de l'aluminium et du fer dans la zone d'interaction entre les deux métaux montrées à la figure 5.53 155

Graphique 5.18 : Diagramme de phase cuivre-étain, SGTE Collection, 2005 159

Graphique 5.19 : Analyse de la surface de laiton à l'extérieur de la zone endommagée thermiquement par de l'étain 164

Graphique 5.20 : Analyse à la jonction avec de la surface de laiton de la pièce au pourtour de la zone endommagée par l'étain 164

Graphique 5.21 : Analyse dans la zone endommagée par l'étain sur la pièce de laiton 165

Graphique 5.22 : Évolution de ces éléments (Cu,Zn,O,Sn) dans la zone de 328µm 167

Graphique 5.23 : Évolution de ces éléments (Cu,Zn,O,Sn) dans la zone de 421.1µm 168

Graphique 5.24 : Analyse de la surface d'un dommage par court-circuit sur un conducteur de cuivre 178

Graphique 5.25 : Évolution du cuivre et de l'oxygène dans la zone de 366.5µm 181

Graphique 5.26 : Intensité du courant de court-circuit en fonction du temps pour un conducteur de cuivre à 120 volts, de calibre 14 AWG 182

Graphique 5.27 : Variation du voltage en fonction du temps lors d'un court-circuit sur un câble de cuivre de calibre 14 AWG, Experts-Conseils CEP, 2005 183

Graphique 5.28 : Variation de l'intensité du courant en fonction du temps lors d'un court-circuit à 120 volts pour un câble de cuivre 14AWG, 2005 184

Graphique 5.29 : Variation de l'intensité du courant en fonction du temps lors d'un court-circuit à 120 volts pour un câble de cuivre 14 AWG, 2005 185

Graphique 5.30 : Variation de l'intensité du courant en fonction du temps lors d'un court-circuit à 240 volts pour un câble de cuivre 14 AWG, 2005 186

Graphique 5.31 : Variation de l'intensité d'un court-circuit d'un court-circuit en fonction du temps, pour un essai à 240 volts, Experts,Conseils CEP, 2005 187

Graphique 5.32 : Analyse de surface dans la zone endommagée par court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre 195

Graphique 5.33 : Composition dans la région endommagée par court-circuit sur le câble d'aluminium 199

Graphique 5.34 : Intensité de l'arc électrique sur un câble d'aluminium en fonction du temps, Experts-Conseils CEP, 2005 201

Graphique 5.35 : Intensité de l'arc électrique sur un conducteur d'aluminium en fonction du temps, Experts-Conseils CEP, 2005 201

Graphique 5.36 : Analyse de composition dans la zone endommagée par court-circuit entre l'aluminium et l'acier 207

Graphique 5.37 : Analyse de composition en surface du conducteur d'acier, près de la trace de court-circuit impliquant l'aluminium 207

Graphique 5.38 : Variation de l'oxygène, de l'aluminium et du fer dans la zone affectée par un court-circuit dans la zone de 384,1μm 211

Graphique 5.39 : Éléments sur la surface générale de la pièce de laiton 215

Graphique 5.40: Éléments dans la zone de la trace de court-circuit entre l'étain et le laiton 215

Graphique 5.41 : Évolution du cuivre, du zinc et de l'oxygène dans la zone d'analyse 217

Graphique 6.1 : Diagramme de solubilité entre l'oxygène et le cuivre,

SGTE 2005 220

Graphique 6.2 : Solubilité de l'oxygène dans le fer, SGTE Collection, 2005 221

Graphique 6.3 : Solubilité de l'oxygène dans l'aluminium, SGTE Collection 222

Graphique 6.4 : Pertes de masse en fonctions des énergies de courts-circuits pour les conducteurs de cuivre et d'aluminium 230

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

Selon le ministère de la Sécurité publique du Québec, les statistiques les plus récentes dévoilent un nombre total d'incendies environnant les dix mille sept cent soixante-dix (10 770) en 2002. Parmi toutes les causes possibles pour expliquer ces sinistres (voir figure 1.1), une défaillance électrique ou mécanique était retenue dans 18 % des cas.

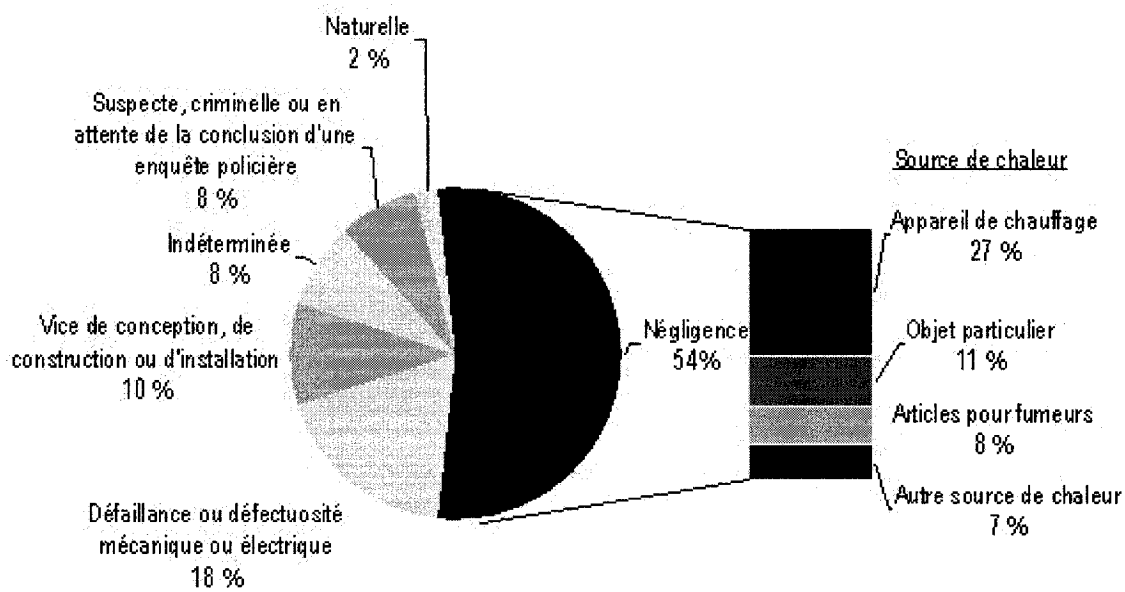


Figure 1.1 : Répartition des incendies selon la cause probable, Québec, 1992 à 2002, ministère de la Sécurité publique du Québec

Une défaillance électrique implique un problème relié aux divers appareils de l'installation électrique d'un bâtiment. Or, il appert que ces appareils sont constitués en majorité de cuivre, d'acier et de laiton. À cet effet, notons tous les câbles électriques des systèmes permanents, lesquels sont couramment identifiés par le terme « filage » et dont la composition est constituée généralement de cuivre, bien qu'il subsiste encore quelques installations avec de l'aluminium. Les jonctions et épissures entre ces divers appareils s'effectuent à l'intérieur de boîtes de jonction en acier ou en polymère, et sont

assurées par des connecteurs dont les filets sont constitués d'acier. Il est également fréquent d'identifier d'autres jonctions entre des câbles de cuivre et des composants de laiton lorsqu'il s'agit d'alimenter des interrupteurs, des prises de courant et plusieurs autres dispositifs dont le raccord est assuré par des vis habituellement en laiton. En ce qui concerne les installations non permanentes, tels les cordons prolongateurs et tout autre composant alimenté via les prises de courant, elles impliquent également des conducteurs de cuivre. L'investigateur incendie examine alors l'ensemble de ces composants afin d'identifier des signes visibles en surface, lesquels constitueront des points de repère et des indications pour comprendre le comportement de l'incendie et ainsi déterminer son origine et sa cause.

1.1 Problématique

L'ensemble des travaux et ouvrages relatifs à l'investigation incendie en vue de déterminer son origine et sa cause ont été écrits par des ingénieurs électriques et par des chimistes. Ce fait découle directement de l'approche scientifique de ce phénomène qui d'une part, implique, affecte et détruit ce qui est sous tension à l'intérieur d'un bâtiment et d'autre part, englobe l'environnement et de multiples réactions chimiques générées par la combustion et la carbonisation. Cependant, en ce qui concerne les systèmes électriques, il est de mise de noter que ce qui subsiste suite à un sinistre est l'ensemble des composants et appareils non énergisés en tant que matériaux métalliques. En effet, la panoplie d'interactions et d'activités de nature électrique initiées lors d'un incendie implique la conception, l'installation et le fonctionnement des circuits électriques, lesquelles activités relèvent en grande partie du génie électrique. Cependant, l'appréciation et l'interprétation des signes résultant de ces phénomènes de dégradation des divers éléments des circuits électriques demeurent une compétence du génie métallurgique, puisqu'il est question de réactions entre des composants métalliques et l'environnement.

Il importe de mentionner que les températures moyennes atteintes au sein du brasier lors d'un incendie sont de l'ordre de 800 °C à 1 000 °C, et donc seuls les éléments métalliques dont la température de fusion est supérieure à ces valeurs demeureront pour examen suite à un tel sinistre.

Ainsi, c'est l'examen de ces éléments métalliques combiné à d'autres techniques spécialisées qui permet de reconstituer le sinistre et par conséquent, de caractériser le comportement de l'incendie de sa naissance à son déclin. Cet aspect, purement métallurgique, a été jusqu'à maintenant, principalement traité et analysé par des professionnels autres que des métallurgistes. De ce qui précède, l'interprétation des signes et dommages identifiés sur les éléments métalliques repose en grande partie sur l'examen visuel. Il est toutefois très facile de se méprendre sur la signification exacte des endommagements et ainsi utiliser de fausses prémisses et une compréhension erronée des phénomènes pour déterminer la cause d'un incendie. D'ailleurs, la proportion de 18% des causes d'incendies liées à une défaillance (figure 1.1) s'en trouve ainsi affectée et il est possible que plusieurs incendies aient été classés d'ordre relié à une négligence (54%) alors qu'ils étaient attribuables à des défaillances et inversement.

1.2 But et objectifs du projet

Le but du présent mémoire est donc d'utiliser la métallurgie pour caractériser judicieusement les dommages observés sur les appareils des installations électriques suite aux incendies. Plus précisément, différentes caractéristiques métallurgiques, dont notamment la nature des matériaux, leur environnement et leur cinétique de dégradation, lesquelles sont identifiables lors d'examens macroscopiques et microscopiques, constitueront des barèmes et outils scientifiques permettant d'interpréter de façon reproductible, la nature des dommages observés sur les conducteurs.

Ainsi, l'examen et l'analyse du comportement des systèmes électriques en vue de déterminer la cause d'un incendie seront réalisés grâce à une approche métallurgique, pour se concentrer sur l'examen fondamental du comportement des métaux dans des environnements extrêmes d'un incendie ou de défaillance électrique (court-circuit). En d'autres mots, il s'agit de distinguer les impacts, sur la dégradation de divers métaux, des effets thermoélectriques et des conditions de court-circuit qui provoquent un incendie.

Ce projet vise donc principalement à établir les caractéristiques propres à des endommagements résultant d'une activité électrique ou d'une interaction thermique. L'établissement de ces caractéristiques permettra, par comparaison suite à un examen métallurgique, de déterminer la nature même des dommages et par conséquent, leur utilisation juste et précise pour la compréhension et l'explication de l'origine et la cause des incendies.

1.3 Milieu généré par un incendie

Un incendie est, par définition, une réaction exothermique rapide et incontrôlée d'oxydation et de dégradation des combustibles produisant de l'énergie thermique (chaleur) et de la lumière. Or, la quantité de chaleur produite est fonction de plusieurs paramètres, dont notamment la nature, la quantité et la disposition des combustibles, l'espace, la quantité d'oxygène (ou comburant) et le temps. Toutefois, tous sont d'avis que le développement d'un incendie de bâtiment, dans une enceinte fermée, et non à l'extérieur, peut être représenté de la façon suivante (figure 1.2), montrant l'élévation de la température en fonction du temps.

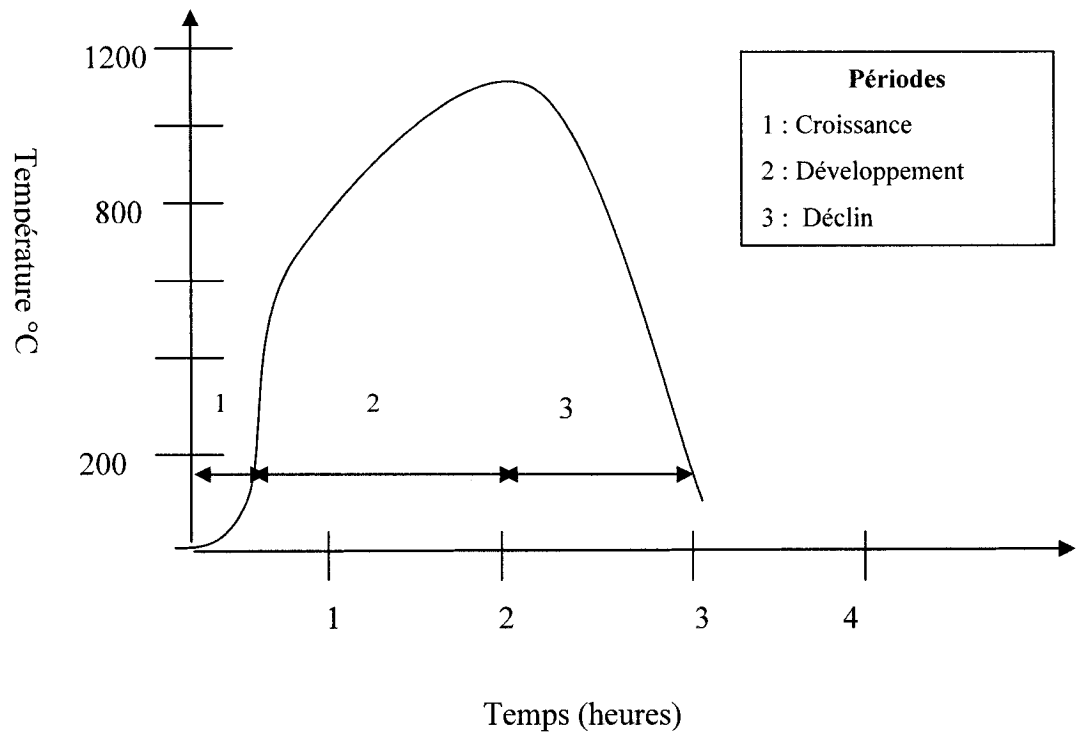


Figure 1.2 : Développement thermique idéal d'un incendie issu du guide NFPA 921

Lors de la période de croissance, la chaleur est produite en brûlant les matériaux combustibles, laquelle s'accumule dans l'enceinte fermée. Durant la période de développement, lorsque la quantité de chaleur devient suffisante et que plusieurs autres conditions sont respectées, il y a embrasement de tout ce qui se trouvait dans la pièce, et ce, de bas en haut, donnant ainsi lieu, par la suite, à la période de déclin. Mentionnons que ce ne sont pas tous les incendies qui engendrent des embrasements, de sorte que certains d'entre eux passent directement à la période de déclin C'est au cours de la période du développement que les températures atteintes au sein du brasier deviennent les plus importantes. En fait, il n'est pas rare d'excéder les 1 000 °C durant cette période. Ainsi, pour les fins du présent travail, nous considérerons des températures de l'ordre de 800 °C-1 000 °C et même plus pour la formation des oxydes sur les composants d'aluminium, de cuivre et de ses alliages. Il est important de mentionner

que la température de fusion du cuivre pur est, quant à elle, de 1083 °C, validant ainsi le fait que certains conducteurs de cuivre puissent être retrouvés fusionnés ou tout simplement perdus par fusion, suite à un incendie.

1.3.1 Environnement gazeux d'un incendie

On ne peut parler de combustion sans parler d'oxygène, gaz nécessaire pour initier le processus de combustion, en présence d'un combustible. Ainsi, l'agent oxydant principal dans un incendie est l'oxygène dont la concentration volumique dans l'air est d'environ 21 %. La combustion peut également être initiée à des taux moindres, dépendant de l'enceinte et du type de combustible impliqué (gaz naturel, propane…). De plus, la température a également un effet important sur la combustion des matériaux.

De façon générale, la combustion d'un matériau peut se produire avec des taux de 14 à 16 % d'oxygène lorsque les températures sont normales (21°C). Il faut cependant souligner que la combustion se produit à des taux d'oxygène moindres, pouvant même approcher les 0 % lorsque la température du milieu d'incendie est très élevée et que le développement de l'incendie se retrouve dans la phase post-embrasement. À cet effet, la dégradation des matériaux solides peut générer certains gaz de pyrolyse qui contribuent à changer la composition gazeuse du milieu où s'effectue la réaction de dégradation.

Il est important de mentionner que les gaz en présence dans un milieu d'incendie ainsi que leur concentration influencent grandement la combustibilité et l'allumage d'un mélange gazeux. À cet effet, nommons des gaz tels le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO_2), l'azote, le propane, le méthane et le gaz naturel dont leur concentration a un impact direct sur les propriétés gazeuses d'un système. Par

conséquent, leur présence peut contribuer à modifier la combustibilité d'un système (voir figure 1.3) et alors influencer le comportement de la combustion.

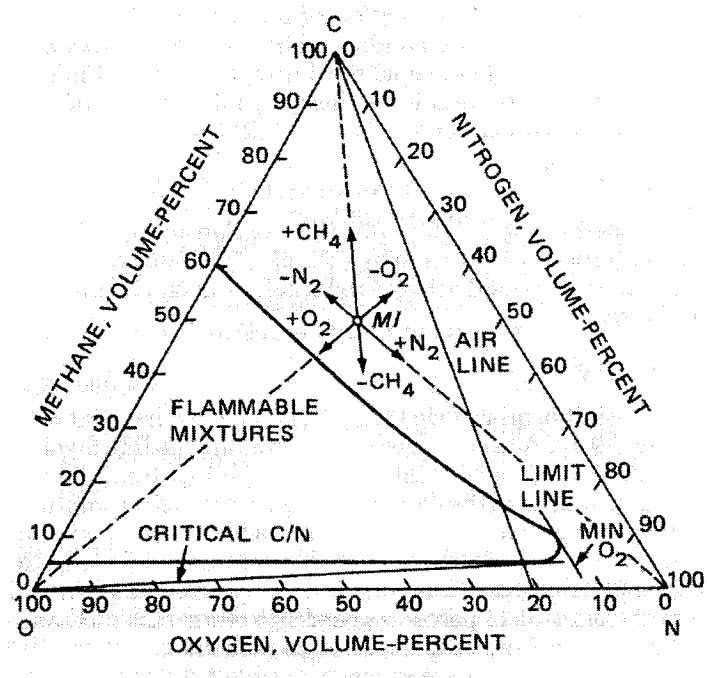


Figure 1.3 : Inflammabilité pour le mélange méthane/oxygène/azote, extrait du livre « *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* » (1988)

Lorsque des gaz autres que ceux constituant l'air s'échappent dans un milieu, la limite d'inflammabilité du système devient dépendante de leur concentration dans le mélange. Il existe deux bornes (inférieure et supérieure) limitant l'intervalle d'inflammabilité du mélange, lesquelles sont liées à la concentration volumique du gaz dans le mélange. Ces bornes sont propres à chacun des gaz.

L'inflammabilité de ces mélanges dépend également de la température du milieu, laquelle est susceptible d'allumer un mélange sans source d'énergie externe. En effet, parmi les nombreux gaz répertoriés dans le tableau 1.1 suivant, certains d'entre eux se caractérisent par une température permettant l'autoallumage du mélange, rendant celui-ci encore plus critique.

Tableau 1.1 : Propriétés de certains gaz inflammables, NFPA 921 (2001)

Gas	Btu per ft³ (gross)	MJ/m³ (gross)	Limits of Flammability Percent by Volume in Air		Specific Gravity (air = 1.0)	Air Needed to Burn 1 ft³ of Gas in ft³	Air Needed to Burn 1 m³ of Gas in m³	Ignition Temp	
			Lower	Upper				°F	°C
Natural gas									
High inert type[a]	958–1051	35.7–39.2	4.5	14.0	0.660–0.708	9.2	9.2	—	—
High methane type[b]	1008–1071	37.6–39.9	4.7	15.0	0.590–0.614	10.2	10.2	900–1170	482–632
High Btu type[c]	1071–1124	39.9–41.9	4.7	14.5	0.620–0.719	9.4	9.4	—	—
Blast furnace gas	81–111	3.0–4.1	33.2	71.3	1.04–1.00	0.8	0.8	—	—
Coke oven gas	575	21.4	4.4	34.0	0.38	4.7	4.7	—	—
Propane (commercial)	2516	93.7	2.15	9.6	1.52	24.0	24.0	920–1120	493–604
Butane (commercial)	3300	122.9	1.9	8.5	2.0	31.0	31.0	900–1000	482–538
Sewage gas	670	24.9	6.0	17.0	0.79	6.5	6.5	—	—
Acetylene	1499	208.1	2.5	81.0	0.91	11.9	11.9	581	305
Hydrogen	325	12.1	4.0	75.0	0.07	2.4	2.4	932	500
Anhydrous ammonia	386	14.4	16.0	25.0	0.60	8.3	8.3	1204	651
Carbon monoxide	314	11.7	12.5	74.0	0.97	2.4	2.4	1128	609
Ethylene	1600	59.6	2.7	36.0	0.98	14.3	14.3	914	490
Methyl acetylene, propadiene, stabilized[d]	2450	91.3	3.4	10.8	1.48	—	—	850	454

Toutefois, puisque le mécanisme de combustion mène à la dégradation de plusieurs matériaux, il entraîne par le fait même la libération, sous forme gazeuse, d'autres espèces, lesquelles peuvent également réagir avec les matériaux présents. À cet effet, il est important de mentionner que les gaz en présence dans un milieu d'incendie ainsi que leur concentration influencent grandement la combustibilité et l'allumage d'un mélange gazeux.

C'est justement le cas du chlore que contiennent les gaines plastiques des câbles et conducteurs des systèmes électriques permanents et non permanents. En fait, le PVC (polychlorure de vinyle) fait partie de la composition des gaines des câbles, et lors du phénomène de combustion, elles laissent s'échapper le chlore qu'elles contiennent sous forme de produit dont le HCl. Cependant, il faut noter que cette dégradation ne mène

pas à la libération du chlore gazeux. Il est également important de mentionner que plusieurs produits ménagers peuvent contenir ce type d'élément qui est porté à l'état gazeux lors d'un incendie. Le soufre constitue également un élément important dans l'environnement gazeux créé lors d'un incendie, puisqu'il est également susceptible d'être libéré lors de la combustion de certains produits.

Il n'est pas rare de retrouver sur des pièces de cuivre ou de laiton, des métaux fondus et fusionnés à ces dernières. En fait, les métaux et les alliages à bas points de fusion, tels l'aluminium et l'étain, deviennent fréquemment liquides au cours d'un incendie. Une fois fusionnés et fortement influencés par la gravité, ils coulent vers le bas et peuvent ainsi tomber sur d'autres métaux et s'y lier. Bien qu'ils n'atteignent pas des températures leur permettant de devenir gazeux, ils peuvent être considérés comme produits liquides dans un environnement gazeux puisqu'ils vont se déplacer. Ces éléments fondus et se liant à d'autres métaux peuvent ainsi créer localement des alliages et permettre la formation d'oxydes propres à cette région localisée sur la pièce.

Ainsi, les diverses réactions se produisant lors d'un incendie impliquent différents éléments gazeux, solides et liquides qui interagissent entre eux pour affecter leur nature et leur intégrité, lesquelles peuvent être caractérisées suite aux sinistres.

1.4 Étapes générales du projet

Dans l'optique de présenter un travail clair et concis, les différentes analyses et études qui ont été réalisées sont exprimées en trois principales étapes, lesquelles permettent de suivre l'évolution du travail et d'exposer les constatations et les résultats. Ces étapes se définissent comme le conditionnement d'échantillons, l'étude macroscopique de ceux-ci ainsi que l'analyse microscopique. En résumé, les trois étapes précitées sont décrites dans cette section afin de faciliter la compréhension et la

lecture de ce document. Mentionnons que celles-ci s'ajoutent à la revue de l'état de l'art.

1.4.1 Le conditionnement des échantillons

Le principe de la réalisation de ce projet repose sur la caractérisation d'échantillons présentant divers dommages, lesquels doivent être faits dans un milieu connu et sous des conditions d'essais contrôlées. C'est la raison pour laquelle tous les échantillons étudiés dans ce document ont été créés en laboratoire ou recueillis en milieu d'incendie. Les diverses méthodes de conditionnement de ces échantillons de même que les différents paramètres considérés lors des essais sont présentés de façon détaillée dans le chapitre 4 de ce document.

1.4.2 Calculs des énergies de court-circuit

Pour chacun des essais de court-circuit et d'arc électrique réalisé en laboratoire, l'énergie associée à ces phénomènes a été calculée à partir des données de l'essai (résultats expérimentaux) ainsi qu'avec les paramètres théoriques jumelés avec les pertes de masse (résultats théoriques). En fait, grâce aux diverses données comme la tension et l'intensité relative à chaque essai pour un temps donné, lesquelles sont traduites par un diagramme, il est possible de calculer l'aire sous la courbe et d'obtenir l'énergie. L'instrumentation de ces essais en vue de l'obtention de ces résultats est décrite précisément au chapitre 4. Quant aux valeurs théoriques, elles sont obtenues par la multiplication de la perte de masse mesurée par la capacité calorifique, et les détails de ces calculs sont présentés à l'annexe 1 de ce document.

1.4.3 L'étude macroscopique

Cette section relate les nombreuses informations et caractéristiques qui peuvent être tirées de l'examen macroscopique des échantillons. Elle dévoile, sous un œil métallurgique, les aspects principalement surfaciques des divers endommagements, lesquels n'avaient été jusqu'alors que décrits par des investigateurs incendie dont la formation était très éloignée du domaine métallurgique. Dans cette section, des caractéristiques seront présentées, permettant déjà de déterminer la nature des dommages, dans certains cas précis. Cette section expose donc différents aspects utiles à la compréhension et à l'interprétation des résultats découlant de la section suivante, sans pour autant pouvoir caractériser judicieusement chacun des endommagements.

1.4.4 L'analyse microscopique

La dernière section de ce document présente l'utilisation des divers outils d'analyse métallurgique afin de déterminer les caractéristiques et indices propres aux différents types d'endommagements. Cette section présente alors divers résultats issus de l'examen des échantillons conditionnés qui n'ont jamais été révélés par cette technique de caractérisation. Pour ce faire, la réalisation de métallographies et l'utilisation du microscope électronique à balayage ont constitué des outils clés permettant de tirer le maximum d'informations des échantillons et de leurs dommages en vue de relever la source de cet endommagement.

En résumé, les trois étapes précitées combinées aux données de la revue de l'état de l'art (revues théorique et scientifique) mettent en lumière les principales caractéristiques propres aux divers endommagements des composants électriques retrouvés suite à un incendie. Les divers paramètres ainsi obtenus peuvent permettre de déterminer la cause précise de ces endommagements.

CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section fait état de l'ensemble des travaux réalisés dans le domaine des incendies de nature électrique afin de rechercher le but premier de l'expertise incendie, soit l'établissement de la région d'origine et de la cause des sinistres. Les divers articles, ouvrages et résumés de recherche relatifs à la réaction des composants électriques en milieu d'incendie vous seront donc présentés afin d'établir les principes de base sur lesquels s'appuie la caractérisation des endommagements.

De plus, ce chapitre présente les principales caractéristiques des différents matériaux étudiés dans ce mémoire à l'état initial, soit en l'absence d'une source de chaleur extérieure. La description de cet état initial constitue un élément essentiel afin de caractériser l'impact d'un incendie ou d'une activité électrique générée par un incendie sur ces matériaux, et les divers changements engendrés par ces éléments.

2.1 Caractéristiques métallurgiques des principaux métaux

La plupart des composants électriques d'un bâtiment sont constitués de cuivre, d'acier, d'aluminium et de laiton. À cet effet, notons tous les câbles électriques des systèmes permanents, couramment nommés le filage, faits de cuivre, lesquels sont joints dans des boîtes de jonction en acier habituellement galvanisé, à des composants de laiton utilisés dans les interrupteurs, les prises de courant et plusieurs autres dispositifs, pour ne nommer que ceux-ci. L'investigateur incendie examine alors l'ensemble de ces composants afin d'identifier des signes visibles en surface, lesquels constitueront des points de repère et des indications pour comprendre le comportement de l'incendie et ainsi déterminer son origine et sa cause.

La fabrication des conducteurs de cuivre et ses alliages, d'aluminium et d'acier est sensiblement la même. Les lingots sont chauffés dans des fours à induction afin de permettre l'étirage des profilés usuels ronds, tubulaires, carrés et rectangulaires. Pour les fils et les câbles, le fil de base est plus ou moins du 4/0 AWG (American Wire Gauge) d'environ 11 millimètres de diamètre selon D.T.S (1983). Il est important de noter que ce fil peut également être obtenu par coulée continue.

2.1.1 Aluminium

L'aluminium utilisé comme conducteur dans la fabrication des câbles des systèmes électriques permanents est de moins en moins rencontré dans les bâtiments, au détriment du cuivre qui s'adapte plus facilement aux dispositifs tels les luminaires et prises de courant. Au cours des années, il s'est avéré que les connexions des systèmes faits en aluminium constituaient le maillon faible du câblage. En fait, les connexions devenaient inconsistantes dues à la présence constante d'oxydation non-conductrice, à son coefficient de dilatation thermique élevé et à la tendance à la corrosion. Par conséquent, les systèmes électriques résidentiels faits en aluminium avaient une courte durée de vie, et c'est une des raisons pour lesquelles ils ont rapidement été remplacés par le cuivre. L'utilisation de l'aluminium demeure encore répandue pour les réseaux de distribution.

Néanmoins, les conducteurs en aluminium étaient composés d'aluminium pur à environ 99,99%. L'alliage couramment utilisé était le EC-H19, dont la composition est régie par la norme ASTM B230, selon le Electrical Conductors Handbook (1977), avec un module d'élasticité de 169 Mpa. Il est intéressant de noter et de comparer les propriétés de l'aluminium par rapport à celles du cuivre. Le tableau 2.1 suivant expose justement ces données :

Tableau 2.1 : Comparaison des propriétés entre le cuivre et l'aluminium, Electrical Conductors Handbook (1977)

	Copper Annealed	Aluminum EC-H19
Direct-Current Resistivity		
Ω mm²/Km at 20°C	17.241	28.264
Ω cir. mil/ft at 20°C	10.371	17.002
Electrical		
Volume Conductivity percent IACS	100.0	61.0
Temperature coefficient of resistance (per °C) at 20°C	0.00393	0.00403
Density (kg/m³) at 20°C	8.890	2.703
(lbs/in³) at 20°C	0.321	0.09765
Thermal Conductivity at 25°C Degree C/Watt/Centimeter²	3.89	2.26
Thermal Capacitance at 25°C watt seconds/degree C/inch³	56	42
Temperature coefficient of linear expansion per degree C	16.5×10^{-6}	23×10^{-6}
Heat Capacity Watts per gram per degree C	0.39	1.0
Melting Point degrees C	1083	652-657
Standard Electrode Potential		
to Copper		− 2.17V
to Iron	+ 0.91V	− 1.26V
to Lead	+ 0.60V	− 1.58V

Considérant les valeurs exposées au tableau 2.1 précédent, il ressort d'importantes comparaisons à tirer de l'emploi de ces deux métaux comme conducteurs. Tout d'abord, le fait que la conductivité de l'aluminium soit de seulement 61% celle du cuivre implique que les conducteurs d'aluminium devront avoir une aire 1,59 fois plus élevée que celle d'un conducteur de cuivre afin de porter la même intensité de courant. Cette différence peut se traduire par une variation de 2 sur l'échelle AWG (American Wire Gauge). Cependant, l'aluminium a comme avantage d'avoir une masse molaire plus faible, entraînant ainsi une diminution de poids pour une section de même longueur, toujours en comparaison avec le cuivre. Or, cette différence de poids peut être rapidement compensée par le fait qu'un diamètre plus élevé de conducteur implique

une quantité supérieure d'isolants, augmentant par le fait même la masse de l'isolant. Il ne faut surtout pas omettre que l'aluminium peut également être susceptible de fluage à basse température, ce qui constitue un important désavantage mentionné dans la Canadian Copper and Brass Development Association (CCBDA) (1997).

Les travaux de Elford (1993) ont révélé que les alliages d'aluminium constituaient des métaux plus actifs que le cuivre et qu'ils corrodaient en milieu aqueux, comme montré à la figure 2.1 représentant un câble d'aluminium dont la gaine a été abîmée, laquelle a permis la corrosion des brins du conducteur. Cette susceptibilité à la corrosion entraînait la diminution notable de la durée de vie d'un câble d'aluminium.

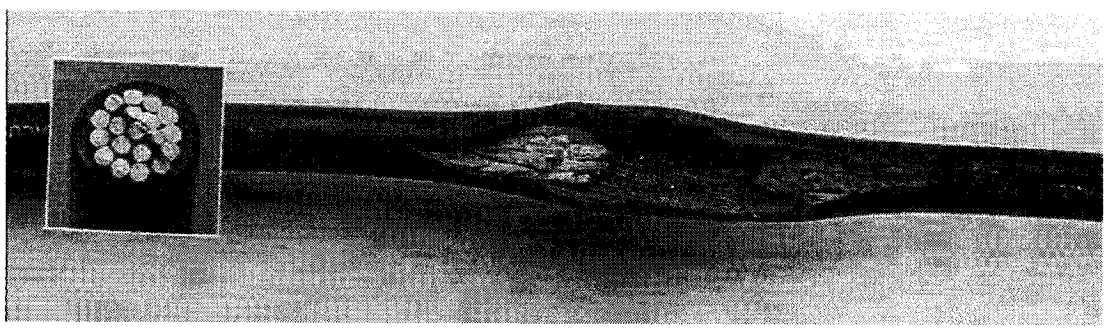


Figure 2.1 : Câble d'aluminium endommagé suite à la corrosion par l'eau, CCBDA, 1997

En fait, de l'eau en contact avec un conducteur d'aluminium recouvert d'une enveloppe isolante donnera lieu à une importante corrosion puisque l'aluminium se transformera en hydroxyde et en gaz d'hydrogène. Les travaux de Luzzi (1982) et Lawson (1989) ont porté sur l'oxydation de l'aluminium en tant que conducteurs et il s'est avéré que l'hydrogène produit par la corrosion de l'aluminium occupait un volume supérieur à celui du métal conducteur. Ceci avait pour effet d'entraîner un gonflement de l'isolation du conducteur, la pénétration de l'eau entre l'enveloppe protectrice et le métal et, éventuellement, la destruction du câble.

En plus de son utilisation comme conducteur, l'aluminium est couramment utilisé comme matériel de protection pour la fabrication de câbles à gaines armées (métalliques). En effet, pour pallier l'endommagement mécanique des conducteurs, des gaines d'aluminium sont construites autour desdits conducteurs isolés, permettant ainsi leur protection.

L'oxydation de l'aluminium se traduit par la croissance de sa couche d'oxyde (Al_2O_3) traitée au chapitre 3 de ce document. Pour l'aluminium, un métal mou, léger, mais résistant, son aspect visuel devient argent-gris mat, dû à cette couche mince d'oxydation qui se forme rapidement quand on l'expose à l'air et qui empêche la corrosion de progresser. Contrairement à l'aluminium qui est un très bon conducteur, l'oxyde d'aluminium est un excellent isolant et protège l'aluminium d'une attaque en profondeur. Cependant, le fait qu'il soit justement isolant rend sa présence non souhaitable pour des applications électriques où la conduction est de mise. À cet effet, des essais de 500 cycles selon la norme C119.4 de l'ANSI ont été réalisés sur plusieurs connexions d'aluminium qui ont répondu aux exigences de cette norme. Or, différents essais en chantier ont démontré qu'un grand nombre de ces raccords ayant subi cette norme s'avéraient inadéquats lorsque soumis aux conditions réelles en chantier selon Braunovic (1992).

De façon générale, la revue de littérature sur l'emploi de l'aluminium résume adéquatement les propriétés de ce métal et les restrictions de son utilisation dues à la formation de son oxyde en surface. Particulièrement, celui-ci étant isolant entraîne des difficultés de conductivité électrique aux jonctions, permettant ainsi des échauffements qui peuvent mener à des défaillances électriques importantes. De fait, l'utilisation actuelle de l'aluminium demeure très restreinte et tend même à disparaître dans le milieu résidentiel.

2.1.2 Cuivre

Compte tenu de l'ensemble de ses propriétés à basse, moyenne et haute température, le cuivre est couramment utilisé comme métal pour la fabrication des câbles, et il remplace l'aluminium depuis plusieurs années. En effet, son excellente conductivité électrique (supérieure à celle de l'aluminium) fait de lui le matériau par excellence dans la construction des câbles. Seul l'argent a une conductivité volumétrique plus élevée. C'est d'ailleurs grâce à sa conductivité qu'il est possible de réduire le diamètre du conducteur de cuivre par rapport à celui qui est en aluminium, pour une même intensité de courant admissible selon l'Electrical Conductors Handbook (1978). De façon pratique, une réduction de la taille d'un conducteur équivaut à une installation moins coûteuse.

En comparaison avec l'aluminium, il est reconnu que les conducteurs de cuivre sont plus robustes et durables, considérant leurs propriétés mécaniques. Ils résistent mieux aux entailles et endommagements mécaniques relatifs à leur installation. Comme ils présentent un module d'élasticité supérieur à celui des conducteurs d'aluminium, ils sont plus faciles à manipuler et à courber pour la réalisation de jonctions selon Timashenko (1997).

Peu d'articles ont été publiés sur les caractéristiques métallurgiques du cuivre utilisé dans la fabrication des câbles, bien que sa réaction avec l'environnement d'un incendie ait été un des principaux sujets en matière de recherche. En effet, il est connu que la microstructure du cuivre sera fortement influencée par la température au sein du brasier et par le phénomène qu'est l'arc électrique. Par contre, à l'exception de cette connaissance, aucun travail métallurgique n'a été effectué pour caractériser l'incidence de ces phénomènes sur la microstructure. En fait, seule la microstructure de base a fait l'objet de caractérisation métallurgique de la part de Levinson (1977). Cependant, il est documenté que le cuivre est écroui ou durci lorsqu'il est employé comme conducteur

pour des lignes aériennes ou des suspensions verticales. Il peut également être recuit pour des applications ne nécessitant aucun effort mécanique à supporter.

Le type de cuivre industriel utilisé pour la confection de câbles électriques est du grade 101, soit le grade le plus pur et il est communément appelé OFHC (*oxygen-free high-conductivity copper)*. Sa concentration minimale en cuivre est de 99.99% et il est fabriqué de façon telle qu'il ne subsiste aucun oxydant résiduel, comme le mentionne la norme BS2873 (1969). En fait, c'est par un phénomène d'électroraffinage, le tout réalisé dans un milieu contrôlé, sous atmosphère réductrice, qu'est obtenu ce cuivre à haute pureté. Par conséquent, il n'existe que très peu d'ouvrages traitant des différentes caractéristiques du cuivre modifié et altéré en milieu d'incendie. Cependant, comme ce type de métal est le plus couramment utilisé et rencontré, il est de mise de porter une attention particulière à tout changement intrinsèque lié à l'exposition du cuivre dans un incendie.

2.1.3 Laiton

De nos jours, le laiton est fréquemment utilisé pour la réalisation de pièces et dispositifs faisant partie intégrante des circuits électriques. Habituellement, le laiton sert à fabriquer des composants à l'intérieur de dispositifs comme des interrupteurs ou est utilisé pour la réalisation de fiches mâles et mâchoires femelles de cordons prolongateurs, de multiprises et de prise de courant. En fait, cet alliage est fréquemment rencontré, autant comme composant des systèmes électriques permanent que non-permanent.

En plus de son excellente usinabilité et sa facilité de moulage, le laiton possède une bonne résistance à la rupture (250 à 500 MPa) ainsi qu'une résistance à la corrosion importante. Ses bonnes conductivités thermiques et électriques et son moindre coût par

rapport au cuivre pur en font un élément de choix dans la fabrication de dispositifs électriques selon la Canadian Copper and Brass Development Association (2005).

La plupart des laitons utilisés dans l'industrie électrique sont nommés alliages binaires et contiennent principalement du cuivre et du zinc à des proportions respectives de 70% à 80% et de 30% à 20%. Le diagramme d'équilibre relatif à cet alliage est reproduit à la figure 2.2. Nous y notons que l'intervalle de solidification est assez étroit, ce qui constitue un critère pour l'obtention d'alliages homogènes.

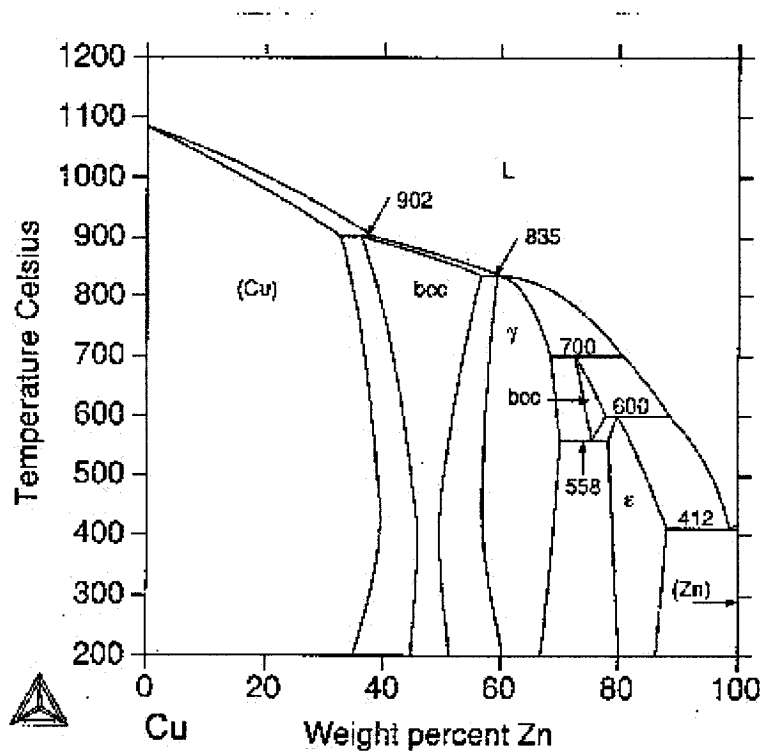


Figure 2.2 : Diagramme d'équilibre cuivre-zinc, selon SGTE collection (2006)

À la température ambiante et à l'équilibre, les laitons sont constitués d'une seule phase α lorsque la teneur en zinc n'excède pas 33%. Au-delà de cette proportion et jusqu'à 46%, nous retrouvons un mélange de phase α et β'. En pratique, la concentration de zinc qui délimite, à température ambiante, les laitons mono et biphasés

est voisine de 36%. Il est important de mentionner que les propriétés électriques du laiton sont grandement influencées par la teneur en zinc. Cependant, sa caractérisation en tant que composant pour diverses installations électriques demeure vague et non documentée dans la littérature.

2.1.4 Acier

Tout comme l'aluminium, l'acier est également utilisé, en milieu commercial, pour la confection de gaines protectrices de câbles. Or, la température de fusion de l'acier étant très élevée, elle est rarement rencontrée en milieu d'incendie, sauf lors d'un arc électrique. Pour ses excellentes propriétés mécaniques, l'acier est également utilisé comme neutre porteur dans les câbles dits triplex servant à l'alimentation en électricité des bâtiments. Il agit ainsi comme l'âme du câble et lui confère une excellente résistance à la traction et à l'étirement. L'acier utilisé comme neutre porteur est recouvert de zinc.

En résumé, les propriétés électriques et le type d'alliage de l'acier utilisé dans les installations électriques ne constituent pas des données importantes puisque l'aluminium ou un autre matériau plus conducteur assure justement la conductivité électrique. En fait, l'acier est utilisé pour assurer aux conducteurs faits d'un autre métal, des propriétés mécaniques comme la rigidité. Pour cette raison, il n'y a pas d'ouvrages disponibles sur les caractéristiques métallurgiques de l'acier utilisé dans la construction des triplex ou des gaines de câbles.

2.2 Paramètres des arcs électriques et des courts-circuits

Les températures atteintes lorsqu'un arc électrique se produit sont élevées à un point tel que ce phénomène peut être considéré, du point de vue thermique, comme équivalent à la formation d'un plasma. Les températures générées par l'arc électrique

dépendent grandement des dimensions du point de contact où l'arc se produit, des tensions et du courant. Nonobstant ces paramètres, les températures mesurées varient de 6000°C à plus de 15 000°C. De ce fait, les particules métalliques projetées lors des arcs électriques peuvent enflammer les matériaux à proximité et ainsi, initier un incendie puisque celles-ci sont littéralement vaporisées à des températures grandement supérieures à celles d'allumages de certains matériaux. Ce type de scénario est communément retenu pour expliquer la cause d'un sinistre. La démarche repose sur l'examen des composants électriques suite à l'incendie, duquel sont identifiés des dommages nommés traces d'arcs électriques et de courts-circuits confirmant qu'un tel problème est survenu. C'est pourquoi il est de mise de décrire le phénomène physique à la base des arcs électriques, lesquels peuvent être retenus comme cause ou conséquence d'un incendie.

2.2.1 Phénomène physique

De façon générale, un court-circuit peut être défini, selon le Standard Dictionnary of Electrical and Electronics Terms (1970), comme la mise en contact ou connexion anormale de relativement faible impédance entre deux éléments de potentiel différent dans un circuit, et ce, de façon accidentelle ou intentionnelle. Il existe deux types de court-circuit que l'investigateur en incendie doit connaître, lesquels n'entraînent pas les mêmes conséquences métallurgiques aux divers câbles et conducteurs; ceux-ci se nomment court-circuit franc et court-circuit arquant.

2.2.1.1 Court-circuit franc

Le court-circuit franc se produit lorsqu'un bon contact (non ponctuel) survient entre deux conducteurs de potentiels différents, impliquant pratiquement toute leur surface. Ainsi, la chaleur générée lors du court-circuit n'est pas localisée, mais sera

alors transmise à toute la section de contact des conducteurs, à partir de l'emplacement du court-circuit (figure 2.3).

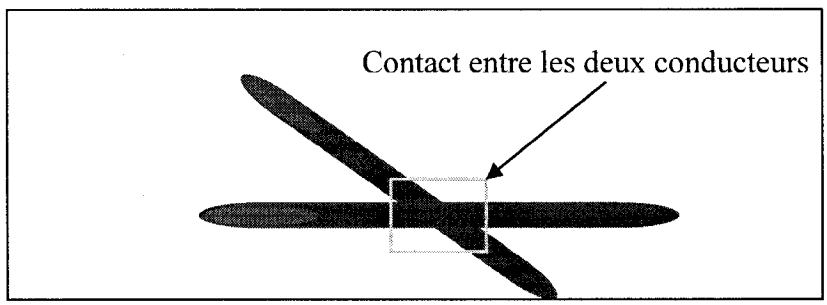


Figure 2.3 : Contact entre deux conducteurs pour court-circuit franc

Ce type de défaut, de par sa nature, engendrera l'opération du dispositif de protection du circuit (fusible ou disjoncteur), interrompant alors son alimentation électrique. Il en résultera une trace de court-circuit impliquant deux conducteurs fusionnés ensemble au point de court-circuit, lesquels peuvent même être sectionnés à cet endroit particulier, comme illustré à la figure 2.4.

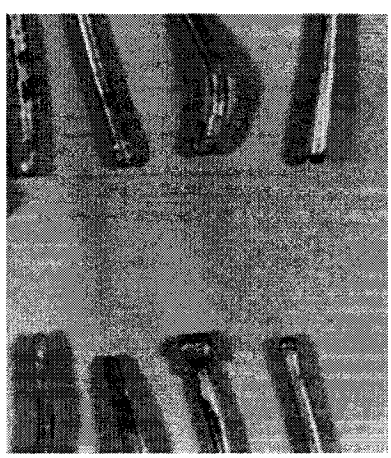


Figure 2.4 : Résultats de courts-circuits francs sur des conducteurs de cuivre, Béland (2005)

Selon Babrauskas (2001), ce type de phénomène se produit très rapidement et la protection devrait opérer tout aussi rapidement, faisant en sorte de limiter grandement la

quantité de métal pulvérisé. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ce type de court-circuit est rarement retenu comme cause d'un incendie.

2.2.1.2 Court-circuit arquant

Le court-circuit arquant, quant à lui, peut être décrit comme le contact momentané entre deux conducteurs à des potentiels différents. Ce court-circuit se produit lors d'un contact restreint où, localement, le métal fusionnera. Les forces magnétiques tenteront alors de séparer les métaux et le film liquide conducteur sera brisé (figure 2.5). Si les conducteurs ne se sont pas sectionnés au point de contact du court-circuit, le dispositif de protection n'aura pas eu le temps de détecter le défaut et ceux-ci seront toujours sous tension.

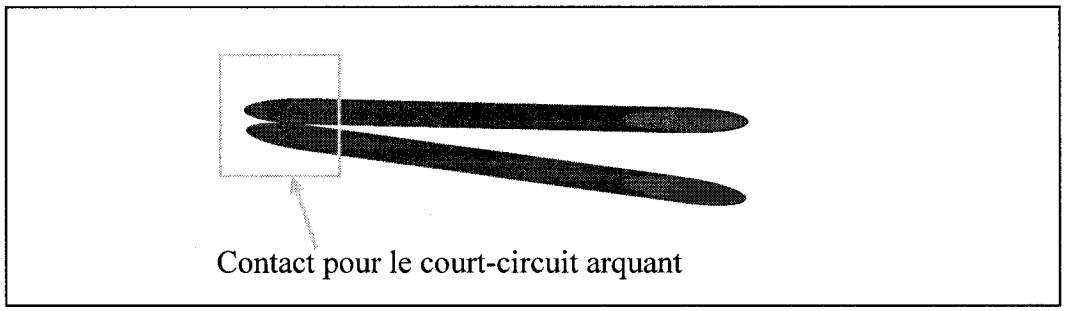


Figure 2.5 : Contact entre deux conducteurs dans le cas d'un court-circuit arquant

L'examen des câbles révélera donc des encoches sur certains des conducteurs ainsi que certaines sections des conducteurs complètement volatilisées (figure 2.6).

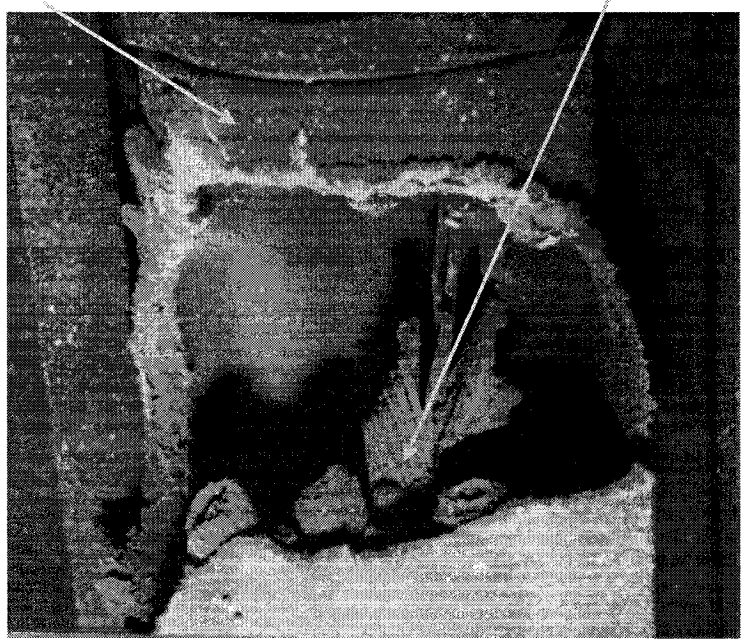


Figure 2.6 : Dommages laissés par un court-circuit arquant, Myers (2002)

2.2.2 Arc électrique

L'arc électrique est, quant à lui, une décharge continue lumineuse à travers un médium isolant, souvent accompagnée d'une volatilisation partielle des composants en contact. Ainsi, l'arc électrique survient également lors du court-circuit. L'application de ces définitions aux phénomènes retrouvés en milieu d'incendie permet d'expliquer ce qui se produit lorsque les conducteurs d'un câble deviennent anormalement en contact les uns avec les autres ou avec divers éléments environnants dont le potentiel est différent.

Il est important de noter que l'arc électrique prédéfini implique le passage du courant dans un milieu qui était auparavant de l'air mais qui est plutôt constitué de particules métalliques résultant de la vaporisation des métaux en contact, en d'autres

mots un plasma. C'est pourquoi les températures locales générées par ces phénomènes sont de l'ordre de 5000°C à 15000°C.

Puisque nous parlons du passage d'un courant d'électrons lors d'un arc, il peut être utile de décrire brièvement le phénomène physique qui survient lors de celui-ci, pour ainsi en noter les enjeux. Trois régions distinctes peuvent décrire l'arc : la région anodique, celle cathodique et la colonne (figure 2.7).

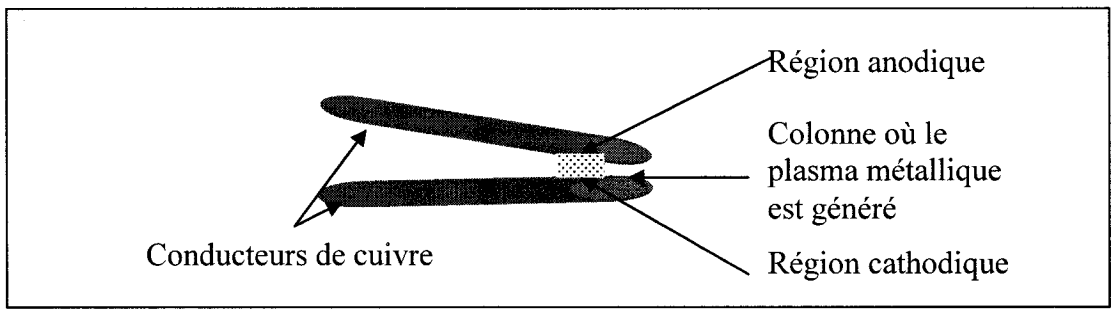


Figure 2.7 : Trois régions distinctes de l'arc électrique

Chacune de ces régions se distingue par sa distribution de température et de courant. Typiquement, la région anodique est séparée de celle cathodique par un espacement d'air où l'arc se produit. C'est dans cette zone (colonne) que les températures sont les plus élevées (5000°C à 15000°C). Une forte pression de gaz ionisé se produit dans cette région, laquelle engendre l'expulsion des gaz chauds et du matériel de l'électrode à tous les points où l'arc se produit selon IEEE (1978). Ainsi, le métal est littéralement expulsé sous forme de plasma à haute température.

2.2.3 Relation court-circuit/arc électrique et incendie

Un court-circuit franc se produit extrêmement rapidement, si bien que l'arc électrique ne dure qu'une infime fraction de seconde, ne générant ainsi qu'une faible quantité de métal en fusion. Dans ce cas, les matériaux environnants le court-circuit ne sont pas nécessairement enflammés suite à celui-ci. Cependant, il existe des conditions

beaucoup plus propices à initier un incendie, dont notamment un court-circuit arquant soutenu dans un milieu partiellement conducteur ou encore dans le cas où les deux électrodes sont rapprochées au point tel qu'elles se touchent pratiquement.

Appliquant les conditions précitées aux composants sous tension dans un bâtiment, il en résulte que l'arc se produit dans l'isolant autour des conducteurs où s'installe alors un chemin de carbonisation relié à la pyrolyse, Babrauskas (2001). Ce chemin de carbonisation, se développant selon les lois de la conservation de la masse et de l'énergie, se produit dans des conditions d'énergie minimale, c'est à dire en empruntant des régions affaiblies par notamment un défaut de fabrication dans l'isolant, une entaille mécanique ou autre. Quant à la pyrolyse, il faut spécifier que celle-ci est le résultat de la puissance thermique (I^2R) découlant d'une fuite de courant du conducteur au matériau isolant. De fait, la fuite de courant persistante contribue à augmenter localement la chaleur, laquelle pyrolyse le matériau et l'arc électrique s'amorce alors, générant des pression extrêmes qui pulvériseront les gaz chauds ionisés et les particules (plasma métallique) sur les matériaux environnants qui s'enflammeront. En d'autres mots, des globules de métal en fusion seront expulsés des électrodes que sont l'anode et la cathode.

Le même phénomène survient, comme conséquence de la propagation de l'incendie, lorsque l'isolant des câbles est dégradé par la chaleur ambiante générée par l'incendie. Plus précisément, la carbonisation de l'isolant autour des conducteurs change la nature même de celui-ci, le dégradant en produits à base de carbone, lesquels deviennent de plus en plus conducteurs. Un infime courant de fuite commencera alors à circuler entre les conducteurs à des potentiels différents, jusqu'à la formation d'un arc électrique. Les températures à proximité de l'arc électrique grimperont, les gaz deviendront ionisés et la conduction sera alors maintenue jusqu'à ce qu'un court-circuit fasse opérer le dispositif de protection (disjoncteur ou fusible), Béland (1977).

2.2.4 Paramètres électriques des arcs

Puisque ce mémoire considère les composants électriques des bâtiments principalement résidentiels, le voltage alors rencontré est de l'ordre de 120/240 Volts. Quant au courant, il est nullement relié à la capacité du dispositif de protection contre les surintensités (fusible ou disjoncteur) protégeant le circuit. En effet, bien qu'un circuit soit protégé par un dispositif de par exemple, 20 ampères, le courant de court-circuit sera cependant beaucoup plus élevé que cette valeur. À cet effet, le voltage et l'impédance du système limitent l'arc qui peut générer des courants aussi élevés que des centaines et même des milliers d'ampères, ce qui sera exposé aux chapitres suivants de ce mémoire.

2.3 Analyse des composants électriques

Il existe divers outils pour déterminer la région d'origine d'un incendie. Le document NFPA 921, *Guide for Fire and Explosion Investigations* (National Fire Protection Association 2001) indique, au chapitre quinze (15), les quatre principaux éléments qui doivent être relevés pour justement déterminer la région d'origine d'un incendie, soit :

- Les patrons de carbonisation,
- L'information tirées des premières personnes sur les lieux du sinistre,
- L'analyse des éléments chimiques et physiques pour évaluer la propagation de l'incendie
- La localisation des traces de court-circuit.

Toujours selon le guide NFPA 921 (2004), nous pouvons y lire que ce dernier élément doit être pris en compte par l'investigateur incendie puisque les composants

électriques identifiés dans une région d'origine constituent, au même titre que d'autres éléments et à part égale, des sources d'énergie susceptibles d'initier un incendie.

La théorie sur laquelle repose cet aspect demeure fort simple ; elle se base sur le principe de la réaction des composants et appareillages électriques sous tension en présence de flammes. Plus précisément, la portion d'un câble ou d'un cordon souple localisée à proximité des flammes sera la première à voir son isolant se dégrader, engendrant alors la carbonisation de celui-ci qui, devenant conducteur, permettra le passage du courant d'un conducteur sous tension à un autre de potentiel différent, engendrant alors un ou des arcs électriques. Ces arcs électriques mèneront à des courts-circuits laissant des traces caractéristiques et lesquels feront opérer le dispositif de protection du circuit (fusible ou disjoncteur), le rendant ainsi hors tension. Lorsque d'autres flammes toucheront ce même composant ailleurs, elles ne créeront aucune trace de court-circuit puisque celui-ci sera hors tension. Elles ne feront donc que dégrader la gaine protectrice sans laisser de traces sur les conducteurs. Plus tard, lorsque l'investigateur incendie examinera la scène pour en déterminer son origine et sa cause, il portera une attention particulière à ces traces de court-circuit identifiées sur les composants des systèmes électriques, lesquelles lui indiqueront qu'en premier lieu, les premières flammes ont touché, atteint et altéré ces composants à un endroit précis, au début du sinistre.

La localisation des traces de court-circuit constitue une technique des plus fiables puisqu'elle révèle des signes objectifs permettant de circonscrire le foyer d'incendie et même de déterminer la cause de l'incendie, encore faut-il interpréter judicieusement ces signes. Puisque plus de 300 mètres de câbles, 30 mètres de cordons souples et 70 dispositifs de sortie électriques peuvent se retrouver dans une seule résidence selon Béland (1984), il est de mise de caractériser précisément la nature des endommagements qui se retrouvent sur ces composants.

Tous les auteurs s'entendent à propos de l'examen des composants d'aluminium lesquels, compte tenu de leur faible température de fusion (660°C), présentent des dommages thermiques suite à un incendie dont la température moyenne se situe aux environs de 800°C. En effet, les câbles d'aluminium utilisés dans le domaine de la transmission d'énergie électrique ont des compositions qui avoisinent celle de l'aluminium pur. Il est donc raisonnable de considérer que la température de fusion de ce métal pur représente celle de fusion des composants d'aluminium localisés sur des scènes d'incendie. Ainsi, bien que des courts-circuits puissent être survenus sur des câbles d'aluminium, la chaleur ambiante générée par l'incendie aura oblitéré ces marques et il ne restera que des dommages attribuables à la chaleur de l'incendie. Par conséquent, l'examen des composants d'aluminium ne peut renseigner les investigateurs en incendie sur la région d'origine et la cause d'un tel sinistre, à moins que l'incendie ait été de faible ampleur et limité à une certaine région.

L'examen des composants de cuivre est cependant autre puisque la température de fusion de ce métal (1083°C) est supérieure à la température moyenne atteinte lors d'un incendie (800°C). Ainsi, les endommagements de ces conducteurs constituent des indices métallurgiques permettant de situer l'origine et la cause d'un incendie.

2.3.1 Dommages par arcs électriques (court-circuit)

Il est fréquent d'identifier sur des conducteurs de cuivre suite à un incendie des dommages qui résultent de courts-circuits, lesquels sont communément appelés traces de court-circuit. Lesdits dommages peuvent être reliés à la cause de l'incendie, ou peuvent plutôt résulter des conséquences de la propagation d'un tel événement. Ces dommages sont engendrés lors de l'arc électrique, lequel génère des températures supérieures à 6000 °K, d'après les travaux de Babrauskas (2004) dont en fait état la figure 2.8.

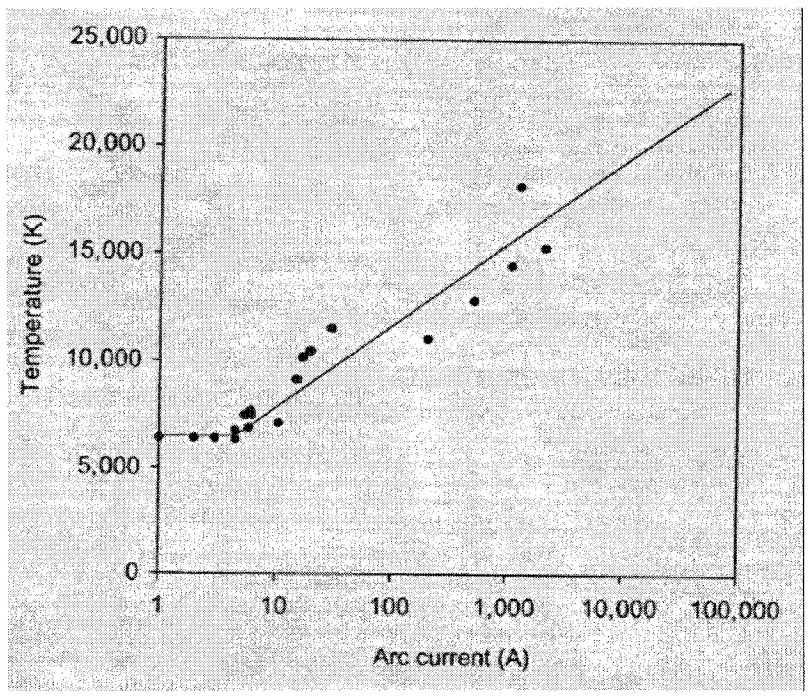


Figure 2.8 : Températures d'un arc électrique en fonction du courant de l'arc (Babrauskas 2004)

Ces arcs électriques ainsi créés laissent des traces sur les conducteurs puisqu'ils permettent la fusion et même l'évaporation du métal des conducteurs au point de contact. En refroidissant, le métal épouse une forme plutôt sphérique et ponctuelle, comme montrée à la figure 2.9.

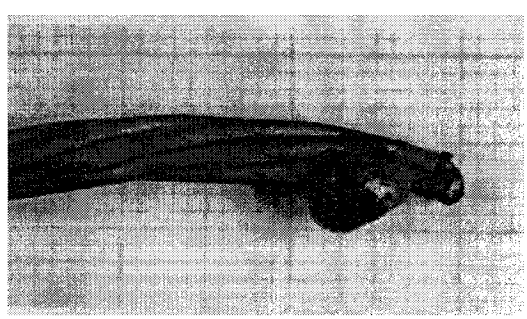


Figure 2.9 : Dommages sur un conducteur de cuivre faits par un arc électrique créé par un incendie (Babrauskas 2004)

Cependant, suivant la collecte de différents conducteurs portant des traces de court-circuit et récupérés dans les bâtiments suite aux incendies, la communauté scientifique oeuvrant dans le domaine de l'investigation incendie dont fait partie Babrauskas (2004) et Ettling (1978) a statué sur les caractéristiques des conducteurs portant des traces d'endommagement par arc électrique. Il a donc été unanimement reconnu que les traces de court-circuit n'étaient pas nécessairement rondes ou sphériques, mais portaient des globules définis et circonscrits et affectaient au moins deux conducteurs ou deux objets à des potentiels différents, comme montré à la figure 2.10.

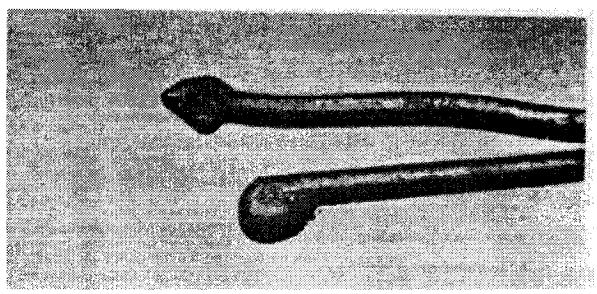


Figure 2.10 : Dommages sphériques laissées par des arc électriques sur des conducteurs de cuivre (Ettling 1978)

L'ensemble des travaux faits pour déterminer des indices métallurgiques permettant de statuer si les dommages en surface des conducteurs peuvent être attribuables à la cause ou aux conséquences d'un incendie n'ont toutefois rien donné à ce jour. Ainsi, il n'existe aucun outil scientifique et métallurgique permettant de préciser les concepts relatifs à cet aspect.

En effet, les observations réalisées dans le cadre des travaux de Erlandsson et Strand (1983) ont démontré que les microstructures et les surfaces d'échantillons présentant des traces de court-circuit, lesquelles ont été examinées au microscope électronique à balayage, ne permettaient pas de discriminer entre des endommagements

ayant initié l'incendie ou étant survenus au cours de celui-ci, comme conséquence de l'incendie. La figure 2.11 illustre justement les résultats de ces deux chercheurs quant à l'impossibilité de différencier les types d'arcs électriques d'après l'examen d'une coupe de leurs globules.

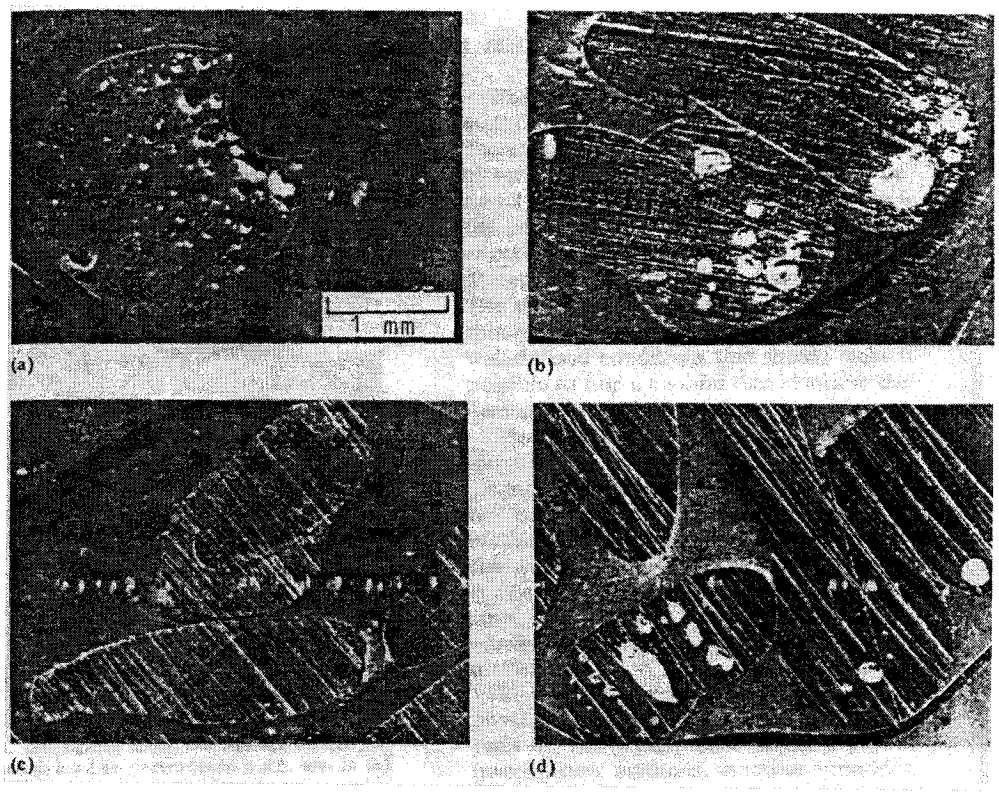


Figure 2.11 : Coupes de sections globulaires sur des conducteurs de cuivre occasionnées lors de circonstances diverses. (a) Arc électrique à l'atmosphère. (b) Arc électrique par une flamme. (c) Court-circuit à l'atmosphère. (d) Court-circuit par une flamme (Erlandsson et Strand 1983)

Cette technique reposait sur l'identification des oxydes en surface du cuivre. Il est d'ailleurs facilement compréhensible que les résultats ne soient pas concluants, considérant la formation d'oxydes de cuivre à haute température lors d'un incendie et ce, en présence ou non de traces de court-circuit. De plus, l'atmosphère extrêmement oxydant au sein même du brasier, lequel dépend grandement des combustibles en

présence et des produits de combustion s'y dégageant, entraîne à lui seul une oxydation prononcée du cuivre. Les paramètres comme la température, le temps et la quantité d'oxygène en présence dans le milieu de l'incendie influenceront significativement l'oxydation du cuivre. En fait, puisque les températures durant un incendie sont élevées et que le temps est un facteur qui n'est pas contrôlé, il est utopique de penser que les oxydes retrouvés en surface du cuivre peuvent se différencier en terme de temps de formation au cours de l'incendie. Ainsi, il est évident que ce dernier élément a été omis par la plupart des chercheurs lors de leurs tentatives de caractérisation des oxydes du cuivre.

Il y a certes eu, au départ, Levinson (1977) qui a identifié que les conducteurs de cuivre fusionnant lors d'un incendie, soit par la chaleur de la flamme ou par court-circuit, devraient révéler une microstructure faite de grains de cuivre espacés de matière riche en oxygène. Cependant, Singh (1987) penchait plutôt sur le fait que des arcs électriques allaient occasionner des oxydes de cuivre (CuO, Cu_2O) près de la surface alors que Takaki (1971) concluait à trois régions distinctes identifiées dans les traces de court-circuit. Ce sont finalement les travaux de Ettling (1978) qui ont démontré qu'il fallait être très critique face aux données récupérées de l'examen des traces de court-circuit puisqu'il n'existait pas vraiment de paramètres reproductibles pour préconiser un scénario plus qu'un autre.

Malgré tout, il est connu que les dommages observés sur les conducteurs de cuivre ne découlent pas uniquement d'une activité électrique mais peuvent également être attribuables à la chaleur de l'incendie, à un endommagement mécanique ou à une interaction avec son environnement. À cet effet, Béland (1984), Erlandsson et Strand (1985), Ettling (1986) ainsi que Delplace et Vos (1986) ont traité de ces différents aspects, mais principalement de façon visuelle, sans avoir recours à des méthodes métallurgiques pour caractériser l'ensemble de ces dommages. Leurs résultats s'appuyaient principalement sur la morphologie macroscopique des dommages.

Il en est de même pour le guide NFPA 921 (2004) qui expose également les principales caractéristiques visuelles identifiées lors de l'examen des composants de cuivre et présente plusieurs exemples d'endommagements.(figures 2.12 et 2.13)

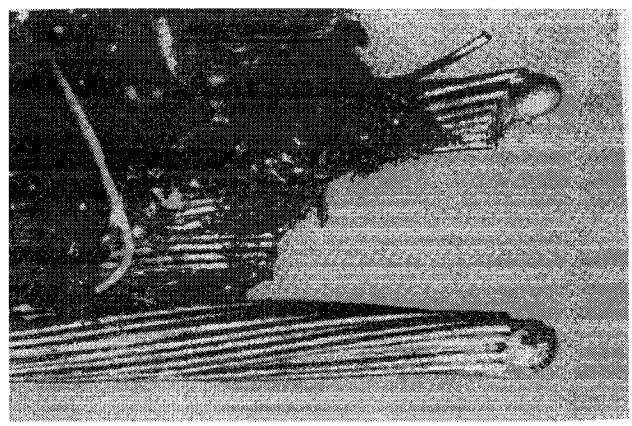


Figure 2.12 : Traces laissées par un court-circuit ayant sectionné des conducteurs multibrins de cuivre (NFPA 921, 2004)

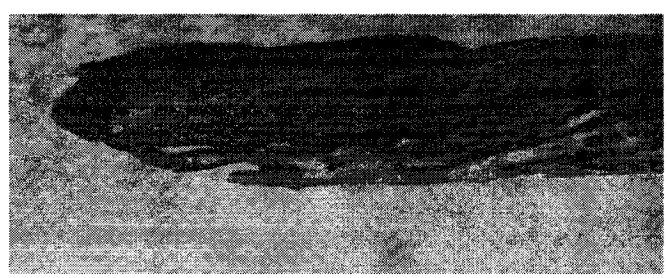


Figure 2.13 : Endommagement thermique ayant sectionné un conducteur (NFPA 921, 2004)

Cependant, d'un point de vue strictement visuel, il peut être excessivement difficile de catégoriser les dommages observés sur certains conducteurs, surtout lorsqu'une scène d'incendie est analysée et fouillée dans la noirceur, aux intempéries et

que les pièces sont souillées de suie. L'identification de dommages sur des conducteurs de cuivre peut facilement être mal interprétée suite à des conditions d'incendie.

Il ressort donc des travaux des auteurs précités que les dommages par arcs électriques devraient laisser les caractéristiques suivantes sur les conducteurs de cuivre: globules précis et localisés alors que les zones adjacentes sont intactes, projection de cuivre sous forme plutôt sphérique (figure 2.14) et dommages aux conducteurs environnants et/ou à la gaine d'un câble sous gaine métallique.

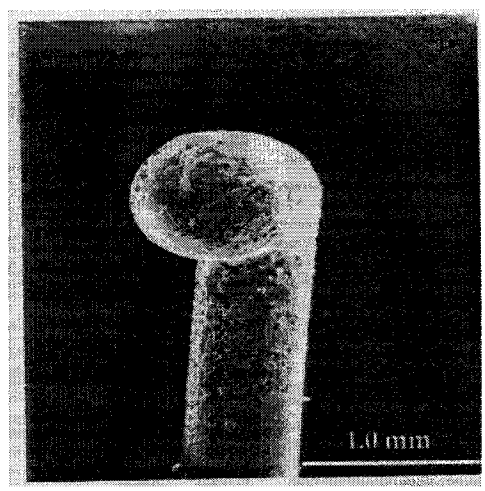


Figure 2.14 : Morphologie d'un brin de cuivre fondu par l'effet d'un court-circuit (Howitt 1998)

Il est également bien documenté qu'un arc électrique puisse sectionner complètement un conducteur ou laisser des marques à plusieurs endroits. À cet effet, il n'est pas rare de retrouver un conducteur caractérisé par une certaine longueur sur laquelle plusieurs traces ponctuelles résultant de projections de métal en fusion générées par les arcs sont notées. Ces endommagements ont la caractéristique d'être localisés et surtout de n'impliquer que les conducteurs au point de contact où l'arc est survenu.

De plus, ce type d'endommagement de nature électrique peut créer des cratères à la surface des conducteurs (figure 2.15). Ceux-ci découlent habituellement de la pulvérisation d'une certaine quantité de métal en fusion. Dans le guide NFPA 921, certaines nuances sont même apportées dans le cas d'arc électrique s'effectuant à un endroit précis (*parting arc*) et n'impliquant qu'une infime partie de chacun des conducteurs. Dans ce cas particulier, il est possible que des conducteurs présentent des dépressions localisées dont l'apparence s'apparente à une demi-lune.

Figure 2.15 : Cratère et dépôt générés par un arc électrique localisé entre deux conducteurs de cuivre (NFPA 921, 2004)

Il arrive parfois que des projections de métal poreux s'observent dans la dépression, lesquelles peuvent être notées par un examen microscopique. Voilà la seule référence à un examen microscopique que nous pouvons retrouver dans le document NFPA 921(2001). Puisque la plupart des investigateurs en incendie se réfèrent à ce document et qu'ils n'ont pas tous une formation technique, il arrive fréquemment que ceux-ci interprètent simplement et bêtement la signification des endommagements et relation avec les critères visuels qui y sont soulignés. À cet effet, il est facile de se

méprendre sur la signification véritable d'un endommagement lorsque les seuls critères d'évaluation considérés demeurent ceux figurant au document NFPA 921 (2001).

La littérature en matière d'investigation incendie décrit les dommages perçus en surface des conducteurs multibrins qui sont attribués à des arcs électriques de la même façon que ceux observés sur les conducteurs pleins. À cet effet, il est documenté qu'un ou plusieurs brins des cordons souples peuvent porter des dommages suite à un court-circuit. Cependant, en aucun cas, nous voyons ces dommages à fort grossissement. Il ne faut également pas omettre que les arcs électriques sur les conducteurs multibrins peuvent n'impliquer que quelques brins, comme montré è la figure 2.16. Dans ce cas, la protection du circuit peut ne pas être sollicitée de sorte que le conducteur demeure sous tension. Il peut ainsi se produire plusieurs arcs électriques avant le sectionnement d'un conducteur, et l'opération du dispositif de protection pour rendre le circuit hors tension. Voilà une des raisons expliquant pourquoi ce type d'installation est susceptible de montrer plusieurs régions caractérisées par des endommagements de nature électrique.

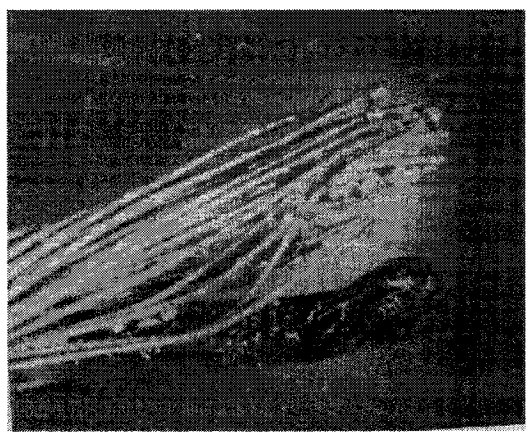


Figure 2.16 : Globules faits par un court-circuit sur plusieurs brins d'un conducteur de cuivre (NFPA 9921,2004)

Au cours de années 1980, plusieurs études ont été entreprises par des chercheurs oeuvrant dans le domaine de l'investigation incendie. La majorité de ces travaux avait pour but d'identifier des éléments objectifs et scientifiques afin de caractériser l'incendie et son comportement, le tout en corrélation avec l'évolution de la façon dont les investigations incendies étaient réalisées. En fait, l'examen des composants électriques est devenu une étape cruciale lors de l'investigation dans l'objectif d'éviter les interprétations subjectives. C'est par conséquent une des raisons pour laquelle les métallurgistes ont été introduits à l'étude des incendies pour la caractérisation des composants électriques. Il est cependant très important que les métallurgistes impliqués aux investigations incendie ne négligent pas certains éléments cruciaux lors de leurs recherches.

Les travaux de Singh (1987) en sont un exemple. Il caractérisa, grâce à des examens au microscope électronique à balayage, les différences morphologiques entre des échantillons de cuivre et d'aluminium présentant des dommages résultant d'arcs électriques et de l'exposition à de hautes températures. Ces résultats, très intéressants, ne considéraient néanmoins pas le fait que les câbles portants des indications physiques de court-circuit se retrouvent exposés à la chaleur de l'incendie également. De plus, il négligeait la possibilité qu'un câble portant des traces de court-circuit puisse, suite à une exposition prolongée à de hautes températures, être endommagé thermiquement, oblitérant alors les signes initiaux relatifs à l'activité électrique. En pratique, il arrive fréquemment de retrouver des composants électriques totalement fusionnés lors d'incendies majeurs. Il faut cependant ne pas oublier que ceux-ci ont sans doute court-circuité au début de l'incendie, avant d'être endommagé par la chaleur.

Les travaux de Howitt (1998) ont cependant éclairé et confirmé la croyance populaire; la détermination de la composition des oxydes dans les globules résultant d'arcs électriques ne permet pas de déterminer si l'arc est une cause ou une conséquence de l'incendie. Les recherches de Henderson, Manning et Barnhill (1998)

abondent dans ce sens. Les concentrations en carbone des traces de court-circuit, obtenues grâce à des examens au microscope électronique Auger du conducteur, ne révélaient aucune corrélation significative entre celles étant la cause ou la conséquence d'un incendie. Ce facteur demeure aléatoire.

Plus récemment, Babrauskas (2004) a entrepris d'évaluer chacune des méthodes qui ont été publiées relativement à l'identification d'une trace de court-circuit cause ou conséquence afin de noter leur exactitude. Celles-ci incluaient notamment des modèles purement théoriques ne représentant pas la réalité d'un incendie en terme de comportement et des essais en laboratoire dans un atmosphère dont la composition différait de celle retrouvée lors d'un incendie Il ressort de ses recherches qu'aucune d'entres elles ne peut caractériser judicieusement la nature d'une trace de court-circuit afin de discriminer entre une cause ou une conséquence. D'ailleurs, les échantillons considérés avaient une proportion insuffisante pour représenter la réalité, de façon statistique.

2.3.2 Dommages thermiques

Dans des circonstances extrêmes où la chaleur au sein du brasier atteint des températures élevées à un point tel qu'elles excèdent celle de fusion du cuivre, le tout dépendant des combustibles en présence, des dommages de nature thermique s'observeront sur les conducteurs de cuivre. Tout d'abord, un apport de chaleur considérable (plus de 800°C) oblitèrera les lignes laissées par la mise en forme des conducteurs de cuivre, soit par le tréfilage. Par la suite, des températures dépassant les 1083°C et maintenues créeront donc sur ces conducteurs des régions fusionnées où le cuivre aura coulé sous l'effet de la gravité. Il subsistera des régions présentant des amincissements ou des épaississements graduels, des formes irrégulières et des agglomérations de plusieurs conducteurs ensemble (figures 2.17 et 2.18). Les surfaces

de ces régions de conducteurs soumises à des températures excédant son point de fusion présenteront des couleurs oscillant entre le rose saumon et le brun.

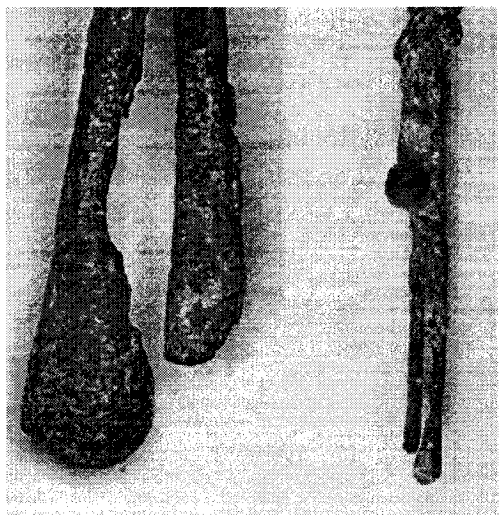


Figure 2.17 : Conducteurs de cuivre oxydés montrant un endommagement thermique (Babrauskas 2004)

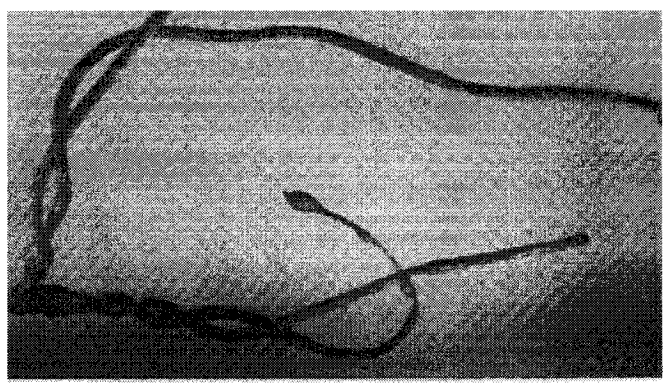


Figure 2.18 : Conducteurs de cuivre fusionnés (NFPA 921,2004)

De plus, puisque les propriétés mécaniques de ces composants auront chuté suite à la recristallisation complète et même à la perte de métal, ces portions de conducteurs

deviendront beaucoup plus fragiles que le reste du câble non exposé à ces températures. Finalement, la fusion thermique des conducteurs de cuivre engendre régulièrement la création de globules ou gouttes dont la morphologie peut être grandement influencée par la gravité.

Pendant longtemps, les investigateurs incendie ont cru, en voyant des globules sur des composants de cuivre, que ceux-ci étaient relatifs à des traces de court-circuit. Or, divers travaux rendus publics ont révélé que la chaleur d'un incendie pouvait, dans certaines circonstances, créer des endommagements similaires à ceux résultant d'arcs électriques.

Ainsi, les travaux de Shaw (1965) en collaboration avec un ingénieur électrique et un métallurgiste ont démontré que la microstructure des conducteurs d'un câble ayant fusionné sous l'effet de la chaleur était différente de celle occasionnée par un court-circuit (figure 2.19). En fait, il est ressorti de ces travaux que la taille des grains d'un conducteur soumis à la chaleur était différente d'un autre ayant simplement court-circuité, ce qui en soit est trivial puisque la chaleur peut faire croître les grains jusqu'à la recristallisation. Cependant, les conditions réelles en milieu d'incendie sont les suivantes : aussi bien les câbles ayant court-circuité que les autres subissent la chaleur de l'incendie, ce qui a été complètement oublié dans cet article.

Figure 2.19 : Microstructures d'un conducteur de cuivre portant une trace de court-circuit (haut) et un endommagement thermique (bas) selon Shaw (1965)

Plusieurs travaux de recherche ont révélé des caractéristiques morphologiques propres aux endommagements résultant de la fusion thermique. Notons les protubérances ou dépressions de formes irrégulières et présentant souvent des arêtes vives, l'absence de ligne de démarcation franche entre les sections fusionnées d'un conducteur et celles qui sont saines et leur localisation fréquente à une extrémité d'un conducteur où un amincissement du diamètre est noté. Les dommages par fusion thermique s'observent souvent sur une longueur appréciable, et ne créent donc pas de modification ponctuelle. De plus, il arrive fréquemment qu'une perte d'une section de conducteur soit notée à proximité de la région fusionnée. C'est ce qui explique que nous retrouvons souvent des masses de cuivre difformes au sol, lesquelles proviennent de la fusion des câbles localisés au-dessus.

De façon générale, les extrémités présentant des globules de grande taille, allongés ou encore dont la forme a été influencée par la gravité, ont été générés par la fusion (figure 2.20).

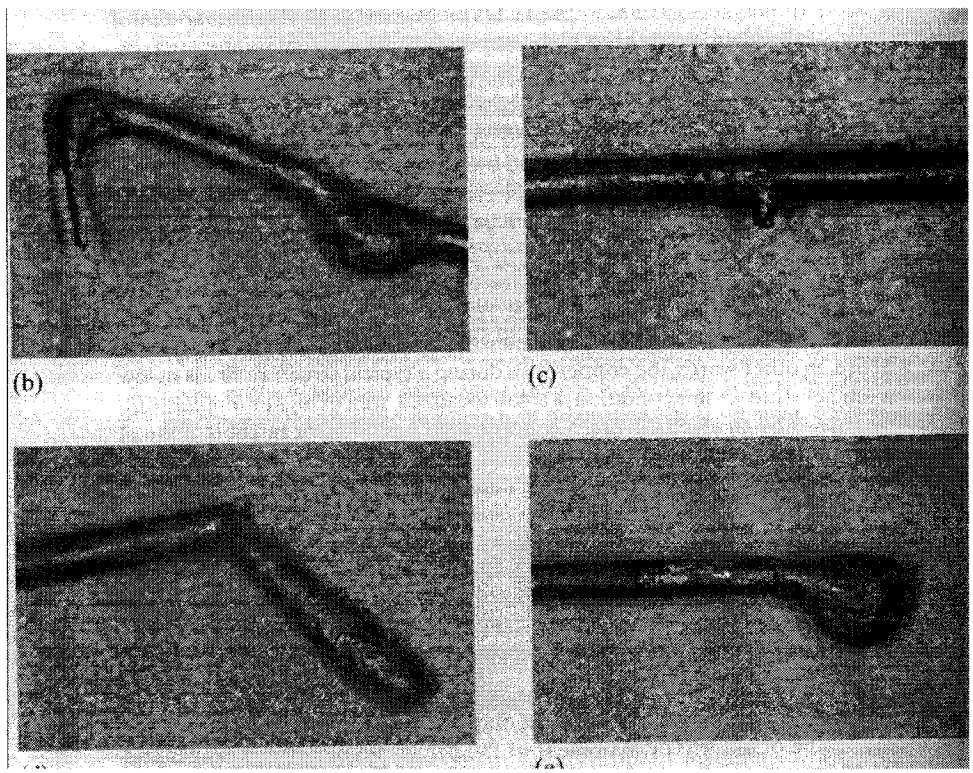


Figure 2.20 : Différents exemples d'endommagements thermiques sur des conducteurs de cuivre (DeHaan 2002)

Il est important de bien saisir que les températures atteintes en divers points d'un câble peuvent varier dépendant des combustibles, entraînant donc des réactions différentes. Il arrive fréquemment que plusieurs brins ou conducteurs soient sujets aux mêmes températures excédant leur point de fusion, ce qui peut résulter en un amas de cuivre fondu impliquant ces composants, sans pouvoir les différencier. Encore une fois, cet endommagement ne sera pas ponctuel mais s'étendra plutôt sur une longueur appréciable pouvant atteindre plusieurs centimètres.

2.3.3 Endommagements mécaniques

Il est fréquent de rencontrer des composants de cuivre montrant des endommagements mécaniques comme des extrémités allongées et brisées de façon conique, des éclisses relevées et des marques d'outils (figures 2.21 et 2.22). Les pompiers, lors de leurs interventions, doivent ouvrir les murs et plafond pour éteindre l'incendie et s'assurer de l'absence de flammes dans ces régions. Il est donc fréquent qu'ils sectionnent des composants électriques lorsqu'ils procèdent à ces tâches. De plus, lors de l'effondrement de certaines parties d'un bâtiment causé par un incendie, les composants électriques s'y trouvant peuvent également être endommagés.

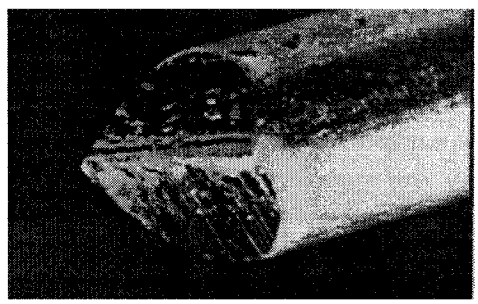


Figure 2.21 : Sectionnement d'un conducteur de cuivre avec une pince (Sanderson 1997)

Ainsi, des traces de pinces laissent l'extrémité présentant deux faciès, lesquels ont été engendrés par les deux ciseaux de la pince. Plus précisément, lorsque des conducteurs ont été sectionnés à l'aide d'un outil tel une pince, l'extrémité coupée portera des lèvres de chaque côté et la rupture finale se fera au centre du brin où une arête traversant complètement le diamètre sera présente. Les faciès portent également de légères stries relatives à l'utilisation de l'outil (figure 2.21). Cependant, des endommagements mécaniques reliés à d'autres types d'objets dont les connecteurs pour réaliser des jonction entre les conducteurs laissent des traces différentes (figure 2.22).

En effet, les marques sont plus ponctuelles mais ne comportent aucune trace de fusion ou d'une activité thermique.

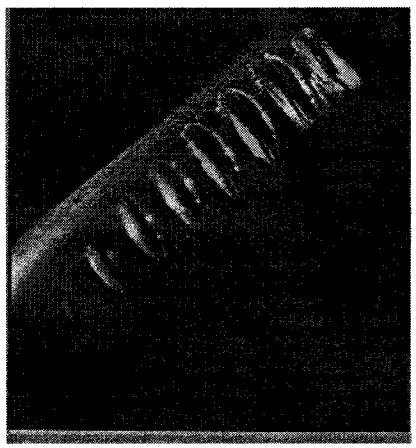


Figure 2.22 : Endommagements liés à un connecteur (Sanderson 1997)

Ces faits sont observés autant pour des câbles ayant été soumis à un milieu d'incendie que ceux non affectés par la chaleur. Compte tenu de ces caractéristiques, un conducteur qui présente des dommages de nature mécanique est facilement identifiable et différenciable d'un autre conducteur soit endommagé thermiquement ou suite à une activité électrique.

2.3.4 Formation d'intermétalliques

Il est possible de rencontrer, suite à un incendie, des métaux dont certaines sections sont fusionnées, sans toutefois que la température ambiante n'ait atteint leur point de fusion. C'est ce qui se produit lorsque deux métaux dissemblables mais présentant une certaine solubilité un par rapport à l'autre entrent en contact alors qu'un des deux est liquide.

Le cuivre est justement sujet à des endommagements en surface engendrés par l'interaction avec d'autres métaux. C'est le cas de l'aluminium qui entre souvent en contact avec le cuivre puisqu'il est couramment utilisé pour la fabrication des gaines de câbles, des composants internes des appareils de chauffage comme les ailettes de dissipation de chaleur ou autres. La résultante de l'interaction de ces métaux peut être traduite par des dépressions en surface, lesquelles sont caractérisées par la présence d'un métal d'une autre couleur (figure 2.23). De plus, il arrive également que l'aluminium dissolve le cuivre d'un conducteur au point tel où celui-ci se sectionne (figure 2.24).

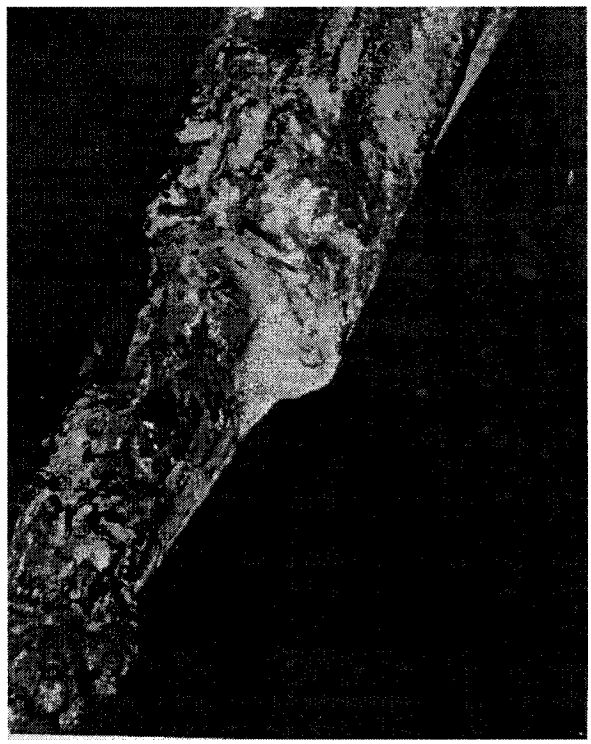


Figure 2.23 : Dissolution d'un conducteur de cuivre par l'aluminium (Béland, 1983)

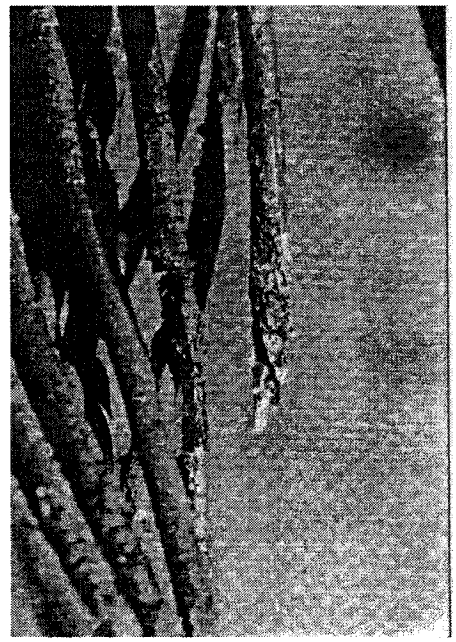


Figure 2.24 : Dissolution et sectionnement de brins de cuivre par de l'aluminium (Fuchs, 1997)

Le diagramme d'équilibre entre le cuivre et l'aluminium (figure 2.25) a été grandement utilisé pour expliquer les raisons pour lesquelles l'aluminium et le cuivre interagissent sous l'effet de la chaleur d'un incendie.

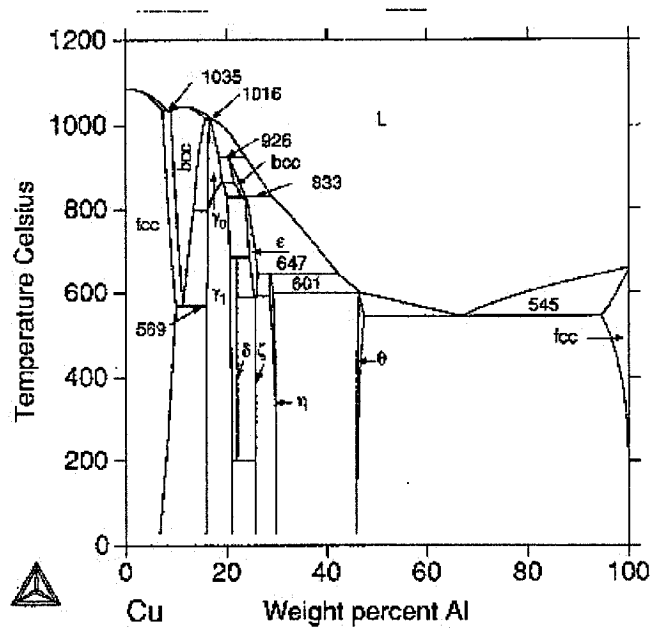


Figure 2.25 : Diagramme d'équilibre cuivre-aluminium, SGTE collection (2006)

Les principes métallurgiques à la base du phénomène sont que, à basse température (548°C), même inférieure à celle de fusion de l'aluminium, ces deux métaux forment des intermétalliques dont notamment ceux obtenus à l'eutectique. Qui plus est, le cuivre a une certaine solubilité dans l'aluminium et vice et versa. Cependant, seuls des examens visuels ont été utilisés comme technique de reconnaissance de ce type de dommage, sans jamais effectuer d'examen métallurgique approfondi. En fait, il est bien documenté dans le document NFPA 921 (2004) que l'aluminium en fusion entrant en contact avec le cuivre créera un alliage de la couleur s'apparentant à celle de l'aluminium, soit un gris foncé. Cet endommagement surfacique qu'est l'alliage cuivre-aluminium est reconnu pour être beaucoup plus fragile que le cuivre, entraînant ainsi fréquemment le bris du conducteur lors de manipulations.

En ce qui concerne le laiton, cet alliage de zinc et de cuivre, il se retrouve souvent fusionné suite à l'incendie, compte tenu de sa température de fusion qui est

inférieure à celle du cuivre pur puisqu'il contient habituellement 30% zinc et 70% cuivre. Cependant, il arrive que cet alliage interagisse avec les conducteurs de cuivre adjacents puisqu'il est connu que ces métaux en contact peuvent former des intermétalliques, compte tenu de l'eutectique (870°C à 980°C). Il n'existe aucun ouvrage décrivant les interactions électriques et thermiques du laiton avec son environnement.

Quant à l'acier, l'ensemble des ouvrages indique que l'acier, dont la température de fusion moyenne est de l'ordre de 1200°C ne fusionne pas lors d'un incendie. Cependant, il est connu que des arcs électriques engendrés sur des conducteurs de cuivre peuvent fusionner et même perforer les boîtiers en acier. Il est également documenté que l'acier et l'aluminium peuvent interagir dans un incendie et que la formation des intermétalliques Fe_xAl_y est généralement très exothermique (figure 2.26), mais le tout n'est supporté que par des examens visuels selon Fuchs (1997).

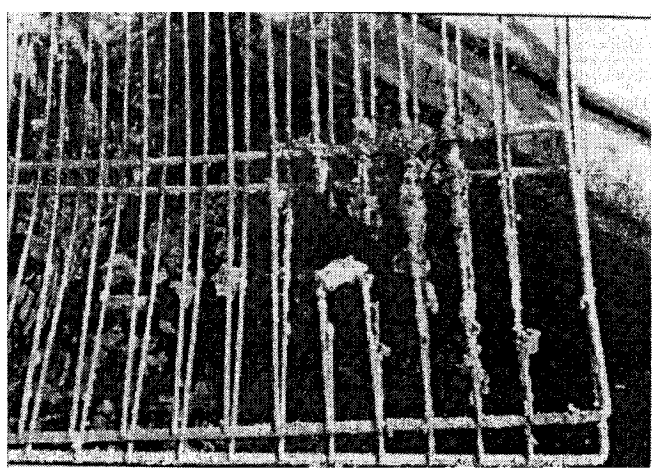


Figure 2.26 : Destruction partielle d'une grille d'acier par de l'aluminium en fusion (Fuchs 1997)

En fait, il existe dans le diagramme Fe-Al un eutectique à 655°C (figure 2.27) et seulement quelques ouvrages ont traité de l'interaction entre ces deux métaux, mais seulement dans le cas de composants hors tension.

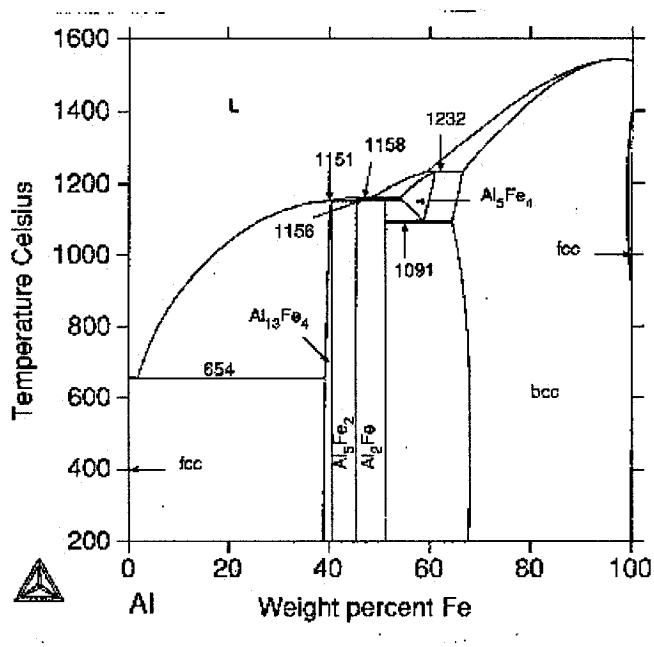


Figure 2.27 : Diagramme d'équilibre fer-aluminium, SGTE Collection (2006)

2.3.5 Résumé de la revue de littérature

Tous les investigateurs incendie utilisent comme référence le document NFPA 921(2001) lors de la réalisation de leur enquête. La dernière version de cette norme date de 2004 et elle comporte encore maintenant, une section sur les différentes caractéristiques permettant de différencier les dommages sur des conducteurs. Bien que divers travaux de recherche aient été effectués ces dernières années, ceux-ci n'ont pas permis de relever d'autres caractéristiques, ne seraient-ce que microscopiques, afin d'identifier judicieusement la nature des dommages en surface de conducteurs

retrouvés et examinés suite à un incendie. Par conséquent, le contenu de cette section n'a pas évolué au cours des dernières années. Le tableau 2.1 suivant, tiré du guide NFPA 921 (2001), résume les divers dommages susceptibles d'être relevés lors de l'examen des composants électriques sur une scène d'incendie .

Tableau 2.2: Sommaire des dommages sur des conducteurs, NFPA 921 (2001)

Mode of damage	Effects	Result of	Cause of fire?
Arcing through char		Direct fire heating	No, always a result of fire
Parting arcing		Heating at about 400°F (205°C) but no direct fire	Usually not
Overcurrent		Short circuit or failure in a device plus failure of overcurrent protection	Yes, but also may be a result of fire
Fire		Cable exposed to existing fire	N/A
Heating connection		Connection not tight	Yes
Mechanical		Scraping or gouging by something	No
Alloying		Melted aluminum on the wire	No

Ce tableau donne des indices visuels fort intéressants pour la caractérisation de dommages en surface des conducteurs. Cependant, il est fréquemment rencontré que des conducteurs présentent des endommagements ne ressemblant à aucune des morphologies montrées dans ce tableau, de sorte que l'investigateur puisse reconnaître certaines difficultés lors de l'identification de la nature du dommage. D'ailleurs, même

si celui-ci dispose des informations contenues dans la revue de littérature précitée, il n'aura aucun barème comparatif et surtout aucune méthode pour l'aider à caractériser lesdits dommages d'où la rédaction de ce mémoire.

2.4 Matériaux isolants

Peu importe le métal conducteur dans les câbles, les matériaux isolants sont sensiblement les mêmes, qu'il s'agisse de câbles en cuivre ou en aluminium. En fait, les plus couramment rencontrés comprennent ceux du type diélectrique extrudé. Nous retrouvons donc des polyéthylènes, propylènes, des polychlorures de vinyle et autres. Il faut également noter qu'un câble est constitué de conducteurs isolés entre eux, et recouverts d'une gaine protectrice.

Plusieurs câbles portent des gaines sur lesquelles nous pouvons y lire les lettres « XLPE », soit un polyéthylène dit « cross linked » ou réticulé. Ce polymère est obtenu en ajoutant au polyéthylène thermoplastique un agent liant le rendant thermodurcissable. Le résultat donne un polymère possédant d'excellentes propriétés thermiques, de sorte qu'il n'existe plus de ramollissement à des températures de l'ordre de 100°C. C'est pourquoi il est utilisé dans des secteurs secs et humides à des températures normales d'opération pouvant atteindre 90°C et est caractérisé par des températures de court-circuits de l'ordre de 250°C selon le document Aluminum Electrical Conductor Handbook (1978).

D'autres câbles sont caractérisés par des gaines ayant la mention PVC (polychlorure de vinyle). En fait, ces gaines sont constituées de PVC auquel sont ajoutés des plastifiants, des stabilisateurs et des agents de remplissage. Ce type de gaine est fortement utilisé dans des applications où des produits pétroliers sont rencontrés.

Les propriétés de ce polymère font en sorte qu'il perd le tiers de sa dureté à 100°C et fond à environ 140°C. Sous la mention TW, les gaines de PVC permettent une utilisation en milieu sec aussi bien que humide jusqu'à environ 60°C. Lorsque le type de PVC est plutôt connu sous la désignation THW, il permet 75°C en milieu humide et 90°C en milieu sec.

Malheureusement, le polychlorure de vinyle (PVC) est l'un des polymères ayant les plus piètres propriétés lorsqu'il est question d'arc électrique, d'après les travaux de Billings et Wilking (1967). Lorsque du PVC est soumis à des températures de l'ordre de 200°C à 300°C, il pyrolyse et se transforme en un produit semiconducteur. Il n'est donc pas surprenant que cette transformation mène à la fuite de faibles courants et éventuellement, à la création d'arc électrique.

La revue de la littérature faite par Babrauskas (2005) au sujet de l'ensemble des travaux relatifs à la dégradation des isolants de type PVC révèle même qu'à des températures de l'ordre de 160°C, un PVC pouvait s'enflammer sous l'effet d'une tension de 100 Volts appliquée à 1mm d'espacement dans ce polymère. De plus, si l'isolant de PVC a été préalablement chauffé à des températures de l'ordre de 200°C à 300°C, une simple augmentation de température de 25°C à 40°C par exemple, est suffisante pour causer son allumage, tel que montré à la figure 2.28.

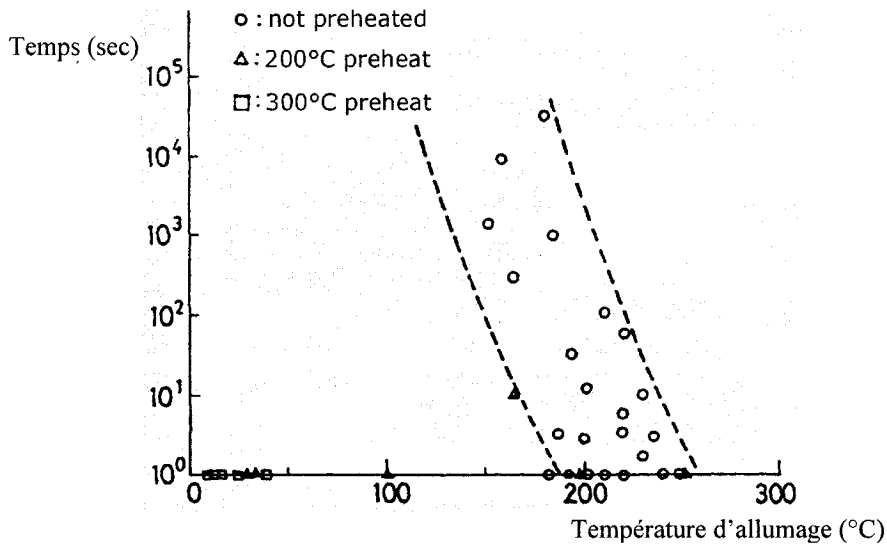


Figure 2.28 : Effets d'une température de préchauffage sur l'allumage du PVC par une tension de 100Volts appliquée à 1mm de séparation, Babrauskas (2002)

Ainsi, il n'est pas très difficile de causer un arc électrique dans ce type d'isolant qu'est le PVC si un chemin conducteur se crée à des températures aussi basses que celles présentées ci-haut.

CHAPITRE 3: ASPECTS THÉORIQUES

Cette section du présent mémoire traite des principaux phénomènes physiques, chimiques et métallurgiques relatifs aux interactions des métaux et de l'environnement en milieu d'incendie ainsi que lors de défaillances de nature électrique. En fait, nous exposons tous les principes reconnus pour qualifier et définir les diverses réactions engendrées par un incendie, leur impact sur les matériaux environnants ainsi que les équations qui gouvernent de tels phénomènes. L'ensemble de ces principes théoriques permet de comprendre le développement, le comportement et les effets d'un incendie, bases essentielles à la compréhension et à l'interprétation du comportement des différents métaux en milieu d'incendie.

En plus du comportement des incendies, cette section définit les réactions des principaux matériaux métalliques tels l'aluminium, l'acier et le laiton à haute température.

3.1 Phénomène d'incendie

Tous les principes théoriques relatifs à l'incendie s'appliquent à l'une ou l'autre des conditions suivantes : le développement de l'incendie et son environnement. Il n'existe cependant pas de théorie claire définissant l'interaction d'un incendie ou de son environnement avec les composants s'y trouvant. En fait, les divers ouvrages traitent d'un échange plutôt thermique, ou se basent directement sur les trois modes d'échange de chaleur présentés à la section 3.1.2 suivante. C'est la raison pour laquelle nous présentons séparément les principes reliés aux incendies de ceux appliqués aux matériaux.

3.1.1 Principes thermodynamiques appliqués à un incendie

Un incendie est une réaction chimique exothermique qui engendre la production de chaleur et de lumière. Cependant, selon la définition de DeHaan (2002), un incendie consiste également en une combustion incontrôlée impliquant des concepts chimiques et thermodynamiques ainsi que la mécanique des fluides et le transfert de chaleur. Pour que ce phénomène se produise, il est nécessaire de réunir les quatre éléments suivants (figure 3.1), formant ainsi le tétraèdre du feu. Il est ainsi possible de prévenir ou d'arrêter un incendie en supprimant un des éléments figurant au tétraèdre. Mentionnons qu'il n'existe pas de relation empirique directe entre ces éléments, bien que leur présence soit nécessaire pour initier un incendie.

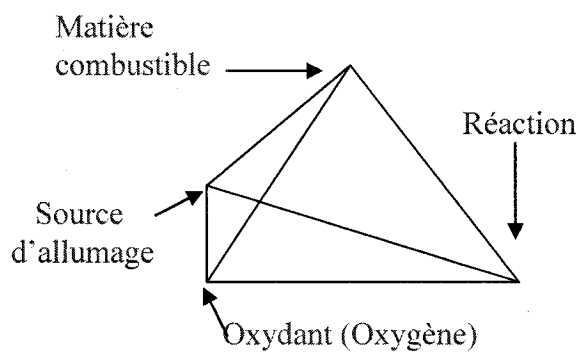


Figure 3.1: Tétraèdre du feu issu du guide NFPA 921 (2001)

La réaction en chaîne ainsi produite libère de la chaleur, soit de l'énergie, sous une forme cinétique qui peut également être exprimée par le transfert de chaleur. Il est important de distinguer la température de la chaleur. Plus précisément, la température est une mesure qui exprime l'activité interne d'un objet par rapport à un point donné alors que la chaleur est l'énergie requise pour maintenir cette température ou pour la faire varier. Pour toute réaction chimique, la température joue un rôle sur la vitesse de réaction. En fait, cette vitesse devrait augmenter lorsque la température augmente. Il

est possible de mesurer cette chaleur par la température, laquelle quantifie l'énergie d'un objet, d'un corps à un état précis. L'énergie totale de ce corps, compte tenu de sa masse, peut s'exprimer par sa capacité calorifique (C_p ou C_v) à pression ou volume constant, qui se mesure en Joules ou BTU/Kg °K avec la conversion de 1BTU = 1055 Joules. Il en est de même pour l'énergie d'un incendie qui peut également se mesurer en joules ou BTU et qui indique alors la chaleur. Il est important de noter que cette chaleur se communique ou se transmet aux objets environnants, ce qui constitue le principe fondamental sur lequel repose la base de ce travail; c'est-à-dire l'interaction composants métalliques et milieu d'incendie.

3.1.2 Transfert de chaleur lors d'un incendie

Lors d'un incendie, la chaleur est transférée à un matériau combustible lequel, lorsqu'il brûle, transfère à son tour la chaleur au milieu. En fait, il existe trois principes fondamentaux d'interaction entre la chaleur ou l'énergie et le milieu lors d'un incendie. Ces trois principes sont les suivants :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

Prenons la situation où un incendie sévit à proximité d'un mur (figure 3.2). La conduction se produira au travers du mur, la convection à l'interface mur/flammes et la radiation, à distance selon Quintiere (1998).

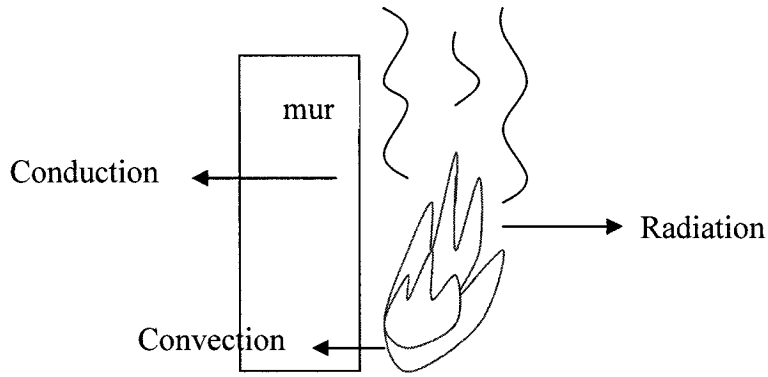


Figure 3.2 : Principes de propagation d'un incendie selon Quintiere (1998)

3.1.2.1 Conduction

La conduction constitue le transfert d'énergie sous forme de chaleur par le contact direct entre différents matériaux, peu importe la nature de ses molécules. Cette conduction exprime alors le transfert de chaleur dans un corps d'une région chaude à une région froide, tel que représenté à la figure 3.3.

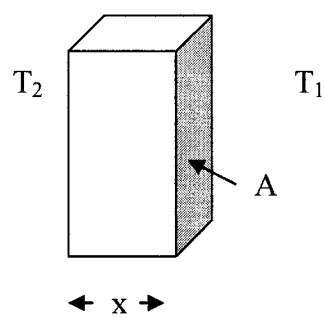


Figure 3.3 : Conduction au travers d'un mur selon Quintiere (1998)

Ainsi, c'est le phénomène de conduction qui est impliqué lorsque des flammes transmettent leur énergie à un matériau en l'allumant par contact, et c'est également ce même phénomène qui explique le changement de température entre deux matériaux qui se touchent. La conduction dépend de la température et des propriétés du matériau comme la conductivité thermique. Il est possible de quantifier la quantité de chaleur qui est transmise par conduction à l'aide de la conductivité thermique *k*, laquelle s'exprime en Watts/m•°K, comme montré à l'équation 3.1. Ainsi, le flux de chaleur peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$\mathbf{q} = kA\,(T_2 - T_1)/x \qquad (3.1)$$

où A :aire de la surface et x : épaisseur

3.1.2.2 Convection

La convection constitue un autre moyen de transférer de la chaleur par l'intermédiaire d'un milieu permettant une circulation. En fait, la convection peut être définie comme un transfert de chaleur dans un fluide ou un gaz par le mouvement de ses molécules chauffées de la source de chaleur vers un milieu plus froid. Plus précisément, ce phénomène peut se produire dans les milieux liquides et gazeux, mais non dans un milieu solide et peut être qualifiée de convection naturelle (libre) ou forcée. Cependant, ce phénomène peut transférer de la chaleur d'un solide à un liquide ou un gaz. La convection permet ainsi un mouvement dans l'air, l'air chaud ayant tendance à monter et l'air froid, à descendre et ce, compte tenu de la différence de densité entre les particules chauffées et non chauffées.

Dans un incendie, les produits de combustion sont chauds et entraînés par le mouvement de l'air, ils réchauffent les éléments environnants. Ce phénomène est l'un

des plus importants lors d'un incendie. La relation empirique de la convection s'exprime, selon l'équation 3.2, en relation avec l'équation de Newton :

$$q = h\Delta T \ (W/m^2) \tag{3.2}$$

h = coefficient convectif de transfert de chaleur dépendant du matériau, de sa forme, des propriétés du fluide…

3.1.2.3 Rayonnement

Quant au rayonnement, il joue un rôle des plus importants dans la croissance d'un incendie, surtout lors d'un embrasement. Le principe est simple : tout objet ayant une température supérieure à 0°K dégage une énergie électromagnétique, laquelle peut se transmettre sans un contact direct entre objets ou milieu de transmission. Encore une fois, ce transfert de chaleur s'effectue d'un objet chaud vers un objet plus froid. Selon la relation de Stefan Boltzmann (équation 3.3), l'énergie émise par rayonnement s'exprime de la façon suivante :

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \ (W/m^2) \tag{3.3}$$

ε = émissivité de la source

σ = constante de Boltzmann

Il est important de mentionner que lors du transfert de chaleur par rayonnement, la position, la nature, l'inclinaison et bien d'autres facteurs influencent grandement l'énergie transmise. Cet aspect est la composante du transfert de chaleur la plus importante.

3.1.2.4 Températures à proximité des flammes d'un incendie

De façon générale, la plupart des composants électriques d'un bâtiment sont localisés à l'intérieur de la structure des murs, planchers et plafonds, ou dans le contenu des pièces. En fait, ceux du système non-permanent tels les cordons souples, prolongateurs et multiprises se retrouvent habituellement à un bas niveau dans les pièces, soit près du plancher. Cependant, les câbles du système permanent sont localisés dans la structure des murs, ainsi que dans les plafonds, s'ils sont évidemment installés de la façon dont le Code de l'Électricité du Québec l'exige. Puisque l'incendie se propage préférentiellement vers le haut, il est logique de penser que ces câbles seront touchés à un haut niveau. Pour qu'ils court-circuitent, la température doit cependant être élevée à un point tel quelle dégradera et même détruira les gaines isolantes. C'est pourquoi il est important de concevoir les principes théoriques des températures générées par un incendie lors de son développement, ainsi que de la transmission de cette chaleur aux objets environnants.

Comme il a été discuté précédemment dans ce chapitre, le développement et la propagation d'un incendie sont régis par trois principes : la convection, la conduction et le rayonnement. C'est justement le premier principe qui cause le mouvement des gaz chauds vers le haut, et l'arrivée de l'air froid à un bas niveau. Ce principe s'applique également au développement des flammes qui sont alimentées en air froid par le bas, et qui croissent en hauteur. C'est ce qui est nommé, en milieu incendie, comme l'entraînement. La croissance des flammes, initialement obéissant à des lois d'écoulement laminaire, deviendra rapidement un phénomène turbulent, créant ainsi des vortex et conduisant à un incendie dont la propagation est incontrôlée. Le tout réside dans le fait que différents facteurs comme le volume d'air, la quantité d'oxygène disponible et le volume des matériaux combustibles peuvent avoir pour effet d'engendrer le passage d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent.

En ce qui concerne la température des flammes turbulentes, elle peut être définie comme une distribution au travers de la largeur des flammes. En fait, les températures les plus élevées se retrouvent au centre alors que les côtés peuvent être considérés comme à la température ambiante. Cette distribution de température (figure 3.4) s'apparente au principe de la loi normale. La température le long de l'axe (z), soit la hauteur de flammes (L_f), dépend de la région de combustion qui est presque centrale à la hauteur des flammes, cette dernière étant la région la plus chaude:

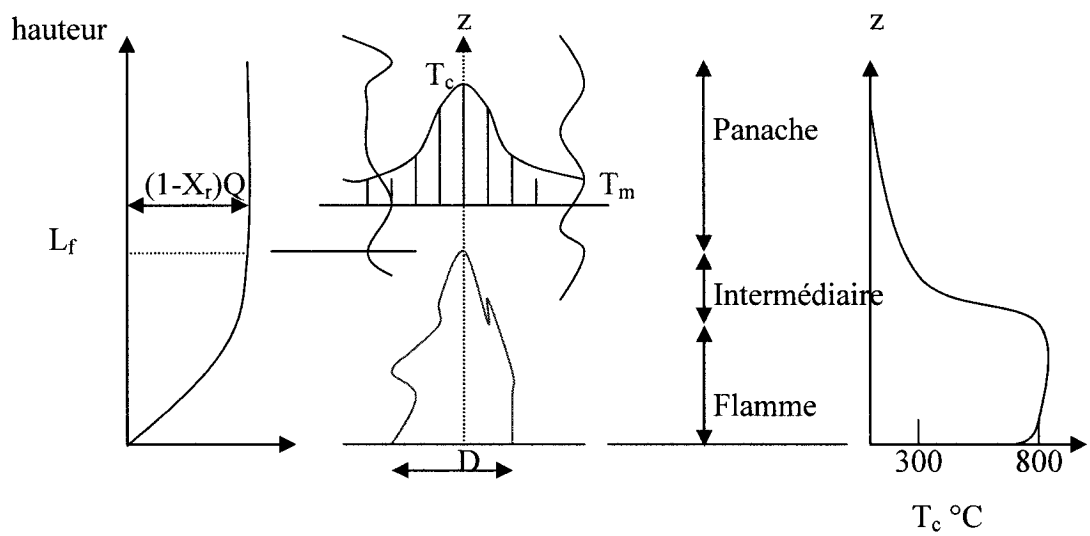


Figure 3.4:Distribution de températures des flammes, Quintiere (1998)

Une théorie simple vulgarisée par Quintiere (1998) permet d'expliquer cette distribution de températures. En fait, au-dessus de la région de combustion, les flammes génèrent une quantité Q d'énergie relâchée dans le milieu, avec la proportion X_r, consistant en la portion d'énergie radiée (par rayonnement) loin de la flamme. Cette énergie radiée hors de la flamme atteint une valeur maximale $(1-X_r)Q$ à la fin de la région de combustion à $z=L_f$. Le taux d'énergie relâchée est distribué selon la hauteur de flamme à mesure que l'air amené réagit pour que la combustion perdure. Lorsque le

combustible réagit à $z=L_f$, le taux d'énergie $(1-X_r)Q$ demeure constant à l'extérieur de la zone de combustion.

De ce qui précède, la zone de combustion peut être considérée comme $z \leq L_f$, et le taux de relâchement d'énergie dans le panache, environnement au-dessus de la flamme peut se traduire par l'équation 3.4 en terme de température moyenne T_m.selon la hauteur :

$$Q = m\, c_p\, (T-T_m), \quad (kW) \tag{3.4}$$

Où c_p = chaleur spécifique des gaz du panache à pression constante (kJ/g°C)
m = Flux massique des gaz du panache (g/s)

Le taux d'écoulement massique dans la plume est pratiquement égal au taux d'entrée d'air. L'énergie relâchée est donc dépendante de la combustion et se traduit par l'équation 3.5:

$$Q = m_f\, \Delta H_c\, (1-X_r), \quad (kW) \tag{3.5}$$

Où m_f= taux massique du combustible réagissant jusqu'à la hauteur z (g/s)
ΔH_c = Chaleur de combustion (kJ/g)

Il est reconnu qu'il y a plus d'air que la quantité requise pour un mélange stochiométrique au-dessus de la flamme. Ceci est relatif à la turbulence affectant le mélange de gaz parfait entre l'air et le combustible. Nous pouvons alors écrire, selon l'équation 3.6, que le taux d'entraînement du mélange d'air est :

$$m = n\, s\, m_f \tag{3.6}$$

Où n = facteur stochiométrique requis pour pallier l'inefficacité du mélange
s = ratio stochiométrique massique entre l'air et le combustible

En combinant les équations précédentes, la relation de l'évolution de la température se décrit selon l'équation 3.7 :

$$T - T_m = \frac{\Delta H_c\,(1-Xr)}{c_p n s} \tag{3.7}$$

Puisque ΔH_c /s est pratiquement constant pour tous les combustibles à base d'hydrocarbures, soit de (3 kJ/g air), et que $c_p = 10^{-3}$ kJ/g°K pour l'air, nous obtenons la relation 3.8 suivante :

$$T - T_m = \frac{3000\,(1-Xr)}{n} \tag{3.8}$$

Ce résultat démontre que la température dans la région de combustion n'est pas vraiment dépendante du type de combustible, à l'exception des variations dans la zone Xr. Selon la littérature, Xr peut varier entre 0,15 et 0,60 pour différents combustibles. Plusieurs calculs, recherches et essais ont été effectués pour déterminer les températures moyennes d'un incendie. Peu importe les combustibles en présence et donc la faible variation de Xr, il en est ressorti que les températures moyennes étaient de l'ordre de 800°C, selon Quintiere (1998). En fait, les températures générées lors d'un incendie sont directement influencées par le type de combustible et sa quantité, la ventilation, l'apport d'oxygène, et plusieurs autres facteurs, lesquels entraînent des hausses moyennes de température de l'ordre de 800°C.

3.1.3 Interactions composants métalliques et incendie

L'atmosphère d'un incendie est extrêmement corrosif compte tenu du fait qu'il contient des produits de dégradation des matériaux combustibles, et ce en phases solide, liquide et gazeuse. Lorsqu'il est question des matériaux métalliques, les réactions les plus importantes rencontrées sont celles issues de l'oxydation des métaux. En fait, les différents métaux traités dans ce mémoire sont justement sujets à l'oxydation à haute température, soit aux environs de 800°C et plus, lors d'un incendie. La réaction de base entre un métal M et l'oxygène se traduit par l'équation 3.9 suivante :

$$aM + (b/2)\ O_2 = \quad M_aO_b \qquad (3.9)$$

Il s'ensuit la croissance d'un oxyde qui sépare le métal de l'environnement, soit de l'atmosphère environnante. Cette couche d'oxyde peut avoir un effet de protection du métal, tant qu'elle demeure intègre, c'est-à-dire sans porosités débouchantes ni fissures et toujours adhérente en surface. Suivant cet état, la vitesse d'oxydation, à température constante, diminuera avec le temps. Il est important de souligner que la loi qui contrôle cette croissance idéale est une loi parabolique de l'évolution de la prise de masse ($\Delta m/S$) en fonction de la température exposée par Huntz-Aubriot et Pieraggi (2000). Notons que cette couche d'oxyde doit être intégrée cristallographiquement avec le métal en assurant une continuité des réseaux cristallins et ce, tout dépendant des métaux en présence. C'est d'ailleurs lors de ces modifications microstructurales que s'initient les contraintes qui peuvent être responsables de la non adhésion des oxydes aux métaux.

Toujours dans l'ouvrage de Huntz-Aubriot et Pieraggi (2000), l'oxydation des métaux à haute température, selon les diagrammes d'Ellingham-Richardson, obéit à

l'équation 3.10 de bilan suivante, considérant M comme le métal et X_2, comme l'agent oxydant :

$$zM + X_2 \Leftrightarrow M_zX_2 \qquad (3.10)$$

L'enthalpie libre Δ_rG (T) associée à cette réaction à la température T se traduit par l'équation 3.11 :

$$\Delta_rG\ (T) = \mu_{MzX2} - z\,\mu_M - \mu_{X2} \qquad (3.11)$$

Quant au potentiel chimique d'une espèce i, il s'exprime selon l'équation 3.12 :

$$\mu_i = g_i^\circ + RT \ln a_i \qquad (3.12)$$

En considérant que g_i° est l'enthalpie libre du constituant i pur dans les conditions où la température est T et la pression P = 1bar, l'expression de l'enthalpie libre Δ_rG (T) devient celle traduite par l'équation 3.13 :

$$\Delta_rG\ (T) = g^\circ_{MzX2} - zg^\circ_M - g^\circ_{X2} + RT \ln \frac{aMzX}{a^z_M\ a_{X2}} \qquad (3.13)$$

$$= \Delta_rG\ (T) + RT\ln Q$$

Avec $Q = \dfrac{a_{MzX2}}{a^z_M\ a_{X2}}$

Il faut préciser que Q est une valeur représentative de l'état thermodynamique du système réactionnel. $\Delta_r G$ (T) est l'enthalpie libre de la réaction d'oxydation initiale, qui dépend uniquement de la température. Lorsque le système est à l'équilibre, $\Delta_r G$ (T) = 0. Ainsi, nous obtenons la relation suivante (équation 3.14) avec l'enthalpie standard :

$$\Delta_r G^\circ (T) = -RT \ln K = -RT \ln \frac{(a_{MzX2})_{eq}}{(a_M)z_{eq} (a_{X2})_{eq}} \quad (3.14)$$

Tout comme $\Delta_r G^\circ$ (T), la valeur de K, la constante d'équilibre, ne dépend que de la température. En fait, cette constante K(T) se traduit par l'équation 3.15 :

$$K (T) = \frac{(a_{MzX2})_{eq}}{(a^{v}{}_{M})_{eq} (a_{X2})_{eq}} \quad (3.15)$$

La combinaison des relations précédentes conduit à l'équation 3.16:

$$\Delta_r G (T) = RT \ln Q/K \quad (3.16)$$

Nous nous basons sur cette dernière équation pour prédire les comportements suivants :

- le système $zM + X_2 \Leftrightarrow M_zX_2$ est en équilibre à $\Delta_r G$ (T)=0, soit lorsque Q=K
- cette réaction évolue dans ce sens $zM + X_2 \rightarrow M_zX$ lorsque $\Delta_r G<0$ (Q/K< 1)
- elle évolue du sens opposé $zM + X_2 \leftarrow M_zX_2$ lorsque $\Delta_r G>0$, soit Q/K>1

L'ensemble des relations précitées s'applique à l'oxydation d'un métal pur, en supposant que l'oxyde M_2X_2 est également pur et stochiométrique de sorte que :

- $a_M = a_{M_zX_2} = 1$

De plus, le gaz X_2 oxydant est également parfait. L'équation 3.17 prend alors naissance :Nous obtenons alors :

$$a_{X2} = P_{X2} / P° = P_{X2} \qquad (3.17)$$

La pression partielle P_{X2} est identifiée au rapport adimentionnel $(P_{X2} / P°)$ car $P° = 1$ bar. Ces hypothèses permettent de simplifier l'équation de l'enthalpie pour obtenir les équations 3.18 et 3.19 :

$$\Delta_r G° (T) = RT \ln (P_{X2})_{eq} \qquad (3.18)$$

Et celle-ci devient :

$$\Delta_r G (T) = RT \ln (P_{X2})_{eq} / P_{X2} \qquad (3.19)$$

L'enthalpie libre standard de réaction $\Delta_r G° (T)$ de la réaction d'oxydation à la température T peut également s'exprimer par l'enthalpie et l'entropie de la réaction, toujours à la température T selon l'équation 3.20:

$$\Delta_r G° (T) = \Delta_r H° (T) - T\Delta_r S° (T) \qquad (3.20)$$

Avec $\rightarrow \Delta_r H° (T) = \Delta_r H° (T_0) + \int \Delta_r Cp° (T)\, dT$ entre T et T_0

$\rightarrow \Delta_r S° (T) = \Delta_r S° (T_0) + \int \dfrac{\Delta_r Cp° (T)\, dT}{T}$ entre T et T_0

C'est à ce stade que nous impliquons les valeurs de capacité calorifique (Cp) des métaux. Il est important de mentionner que lors des réactions d'oxydation, les

variations de $\Delta_r H°(T)$ et $\Delta_r S°$ (T) en fonction de la température sont suffisamment faibles par rapport aux valeurs de $\Delta_r H°$ (T_0) et $\Delta_r S°$ (T_0) pour être négligées. Ceci simplifie alors la réaction de $\Delta_r G°$ pour celle 3.21:

$$\Delta_r G° (T) \quad = \quad \Delta_r H° (T_0) - T\, \Delta_r S° (T_0) \qquad (3.21)$$

C'est sur cette base, dans un repère ($\Delta_r G°$,T), pour un système $M\text{-}M_zX_2\text{-}X_2$, que la variation de $\Delta_r G°$ en fonction de la température T suit une droite de pente $-\Delta_r S°$ (T_0) et d'ordonné à l'origine $\Delta_r H°$ (T_0). Il est intéressant de noter que les changements de pente de ces droites correspondent aux changements de phase du métal M ou du composé M_zX_2. Ce sont ces représentations graphiques qui sont connues sous le nom de diagramme d'Ellingham.

Au chapitre 5 du présent mémoire, ces relations seront utilisées, et plus précisément celles impliquant les enthalpies ainsi que les capacités calorifiques afin de calculer l'énergie libérée lors des courts-circuits. Pour ce faire, les équations précédentes serviront de guide et plus précisément celle incluant la capacité calorifique à pression constante puisque dans un incendie, la pression globale du système peut être approximée à une pression constante, l'ensemble des réactions se produisant dans l'atmosphère à pression atmosphérique. Ainsi, l'équation 3.22 deviendra un outil de calcul considéré au chapitre 5 dans la détermination de l'énergie des courts-circuits :

$$Cp = \frac{dH}{dT} \qquad (3.22)$$

La capacité calorifique d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'échanger de la chaleur au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Toute chose étant égale par ailleurs, plus la capacité calorifique d'un corps est grande, plus grande sera la quantité de chaleur échangée au

cours d'une transformation s'accompagnant d'une variation de la température de ce corps.

3.2 Oxydation des métaux

Il est important de définir les principes généraux qui régissent la corrosion (oxydation) à haute température puisque, comme mentionné dans la section précédente, les températures atteintes dans un incendie sont de l'ordre de 800°C en moyenne. En fait, lorsque des métaux sont soumis à des milieux à l'intérieur desquels règnent des températures supérieures à 500°C, nous pouvons employer le terme de corrosion à haute température. Il est documenté que deux types de dégradation peuvent se produire à ces températures mais nous décrirons dans cette section la corrosion dite « sèche » qui consiste en l'oxydation des métaux par les gaz tels l'oxygène et le soufre. Nous devons préciser que l'oxygène est le gaz dominant dans un incendie, en ce sens que sa présence est nécessaire pour que le phénomène de carbonisation perdure. Par conséquent, c'est justement ce gaz qui affecte le plus les divers métaux dans un incendie.

Les premiers travaux relatifs à l'oxydation à haute température ont été réalisés principalement par Wagner (1951). Selon ce dernier et Kofstad (2000), l'oxydation de la surface d'un métal exposé à l'oxygène peut être divisée en trois étapes :

(i) adsorption de l'oxygène à la surface

(ii) formation d'oxydes individuels qui croissent latéralement pour former une couche d'oxydes continue, donc réaction à la surface

(iii) croissance plus importante du film d'oxyde perpendiculairement à la surface, principalement par diffusion

Par opposition à Kofstad, Wagner pensait que la diffusion dans l'oxyde du métal était l'étape limitante. Cependant, l'ensemble des phénomènes ont été compris, plus tard, notamment par Bird (1960), Slattery (1981) et Kofstad (2000).

3.1.4 Oxydes de fer

La croissance des oxydes de fer est régie par des règles particulières puisqu'il s'agit d'oxydes multiples. L'oxyde est composé de la fraction la plus importante du métal, étant le plus près de celui-ci, comme illustré à la figure 3.5 suivante :

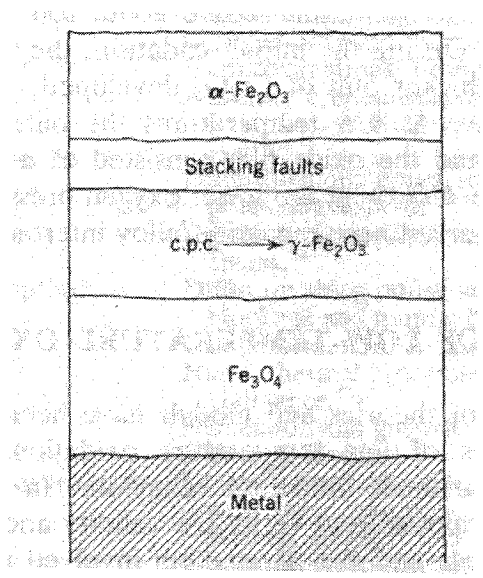


Figure 3.5 : Compositions et épaisseurs des oxydes de fer sur le métal (Kofstad 2000)

La composition et l'épaisseur des divers films d'oxydes se sont révélées être grandement dépendantes de la préparation de surface et de la présence d'impuretés. Les travaux de Boggs relatés par Kofstad (2000) ont démontré l'effet de la pression

d'oxygène sur l'oxydation du fer entre 220°C et 450°C. Il s'est avéré que l'oxyde Fe_3O_4 croissait en premier, suivi de la nucléation du Fe_2O_3 en surface du premier oxyde. Ils ont même observé que, lorsque le Fe_2O_3 avait suffisamment crû pour former une couche uniforme, la vitesse d'oxydation s'en trouvait considérablement réduite.

Pour comprendre l'oxydation de l'acier, et donc du fer, il faut se référer à la figure 3.6. Celle-ci montre trois oxydes de fer; la wüstite ($Fe_{1-y}O$), la magnétite (Fe_3O_4) et l'hématite (Fe_2O_3). Ces trois oxydes ont des structures cristallines différentes, respectivement celle du NaCl, de la spinel et du corundum. Ainsi, le diagramme de phase suivant (figure 3.6) présente justement la formation de ces oxydes en fonction de la température et des proportions d'oxygène.

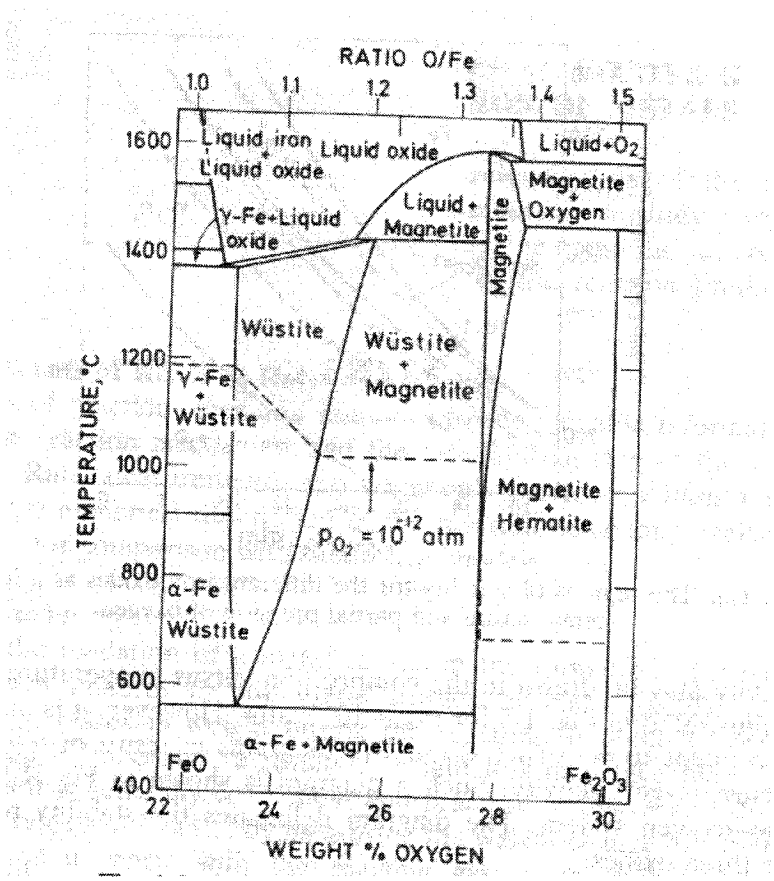


Figure 3.6 : Diagramme de phase fer-oxygène (Kofstad 2000)

La Wüstite est stable seulement à des températures supérieures à 570°C et à des activités réduites d'oxygène, Kofstad (2000). Puisque suite aux incendies, nous examinons les oxydes de fer à basse température, nous parlons plutôt de magnétite (Fe_3O_4) et d'hématite (Fe_2O_3). Il est important de noter que la magnétite a une composition stochiométrique dans ce champ. Finalement , la non stochiométrie du Fe_2O_3 est faible. La conductivité électrique de cet oxyde est indépendante de la pression partielle d'oxygène à des températures supérieures à 650°C. Il faut spécifier que cette conductivité est de type n dans l'intervalle de températures de 650°C à 800°C, et p à des températures plus élevées.

Les travaux de Sewell et Cohen relatés par Kofstad (2000) ont démontré que les deux oxydes présents sur le fer suite à l'oxydation à haute température étaient le Fe_3O_4 et le Fe_2O_3. La proportion des deux oxydes de fer dépendait de l'orientation, mais dans tous les cas, il n'existait pas de limites entre les phases. Ce sont justement ces phases qui se forment lors d'un incendie et leur caractérisation et leur présence seront discutées dans ce document.

3.1.5 Oxyde d'aluminium

L'oxyde d'aluminium Al_2O_3 est le seul oxyde stable d'après les divers travaux de Kofstad (2000). L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant. Son aspect visuel devient argent-gris mat, dû à la couche mince d'oxydation qui se forme rapidement quand on l'expose à l'air et qui empêche la corrosion de progresser. Contrairement à l'aluminium qui est un très bon conducteur, l'oxyde d'aluminium est un excellent isolant et protège l'aluminium d'une attaque en profondeur. Cet oxyde ainsi créé,le Al_2O_3, a de très bonnes propriétés mécaniques. En fait, il se forme en une couche fine à la surface du conducteur, compte tenu des paramètres thermodynamiques associés à la formation de cet oxyde. Cet oxyde peut exister en différentes formes ; les

plus connues étant γ et α. La phase γ se transforme en α à des températures de l'ordre de 900°C à 1000°C. Puisque l'oxyde d'aluminium est un isolant, sa formation et sa présence sur les conducteurs peut avoir un impact des plus significatifs, d'où l'importance de définir sa formation et sa croissance sur les conducteurs.

3.1.6 Oxydes de cuivre

L'oxydation du cuivre est un phénomène différent de l'oxydation de l'aluminium puisqu'il implique la formation d'oxydes multiples, lesquels n'ont pas tendance à se former naturellement en solution aqueuse à 25°C. Plus précisément, deux types d'oxydes se forment en surface du cuivre : Cu_2O et CuO. Leur croissance est grandement influencée par la température environnante lors de leur formation. À ce sujet, il est de mise de souligner les travaux réalisés par Mrowee et Stoklosa relatés par Birks et Meier (1983) quant à l'oxydation du cuivre Cu en CuO et Cu_2O à haute température. Nous pouvons reproduire les résultats de leurs travaux à la figure 3.7 suivante :

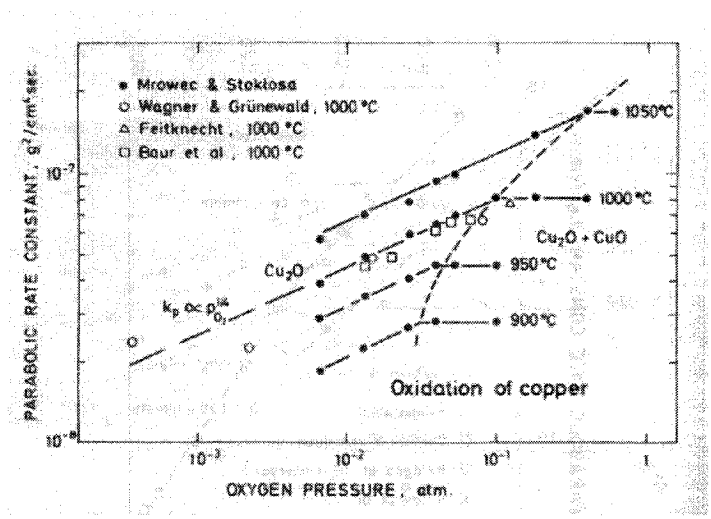


Figure 3.7 : Variation de la constante parabolique du cuivre en fonction de la pression partielle d'oxygène et de la température (Birks et Meier 1983)

La figure 3.7 est très intéressante puisqu'elle montre que la formation du CuO, après que le Cu_2O se soit formé, est très dépendante de la température et de la pression d'oxygène à l'interface entre ces deux oxydes. Ainsi, la portion de gauche du graphique représente le domaine de stabilité du Cu_2O alors que la partie de droite constitue le domaine de stabilité du CuO, et donc les conditions pour qu'il se forme. De ce qui précède, le Cu_2O possède une stabilité plus importante que le CuO. La constante, quant à elle, est totalement différente pour la formation du CuO que pour le Cu_2O. Cette différence peut être attribuable aux types de défauts dans les oxydes, lesquels sont doublement, simplement chargés et neutres. Nous comprenons également de cette figure que la croissance de ces deux oxydes se produit à haute température, d'où l'importance de caractériser ceux-ci puisqu'un incendie implique justement des températures élevées. La situation est autre à basse température. En effet, le cuivre ne forme pas de film passif contre la corrosion, en présence d'oxygène.

Lorsque le cuivre s'oxyde, en présence d'oxygène à haute température, il y a formation et croissance des oxydes précités suivants : Cu_2O et CuO, donc de couches multiples. Prenons le diagramme de phase du cuivre avec l'oxygène , soit la figure 3.8, pour déterminer les conditions de la formation des divers oxydes.

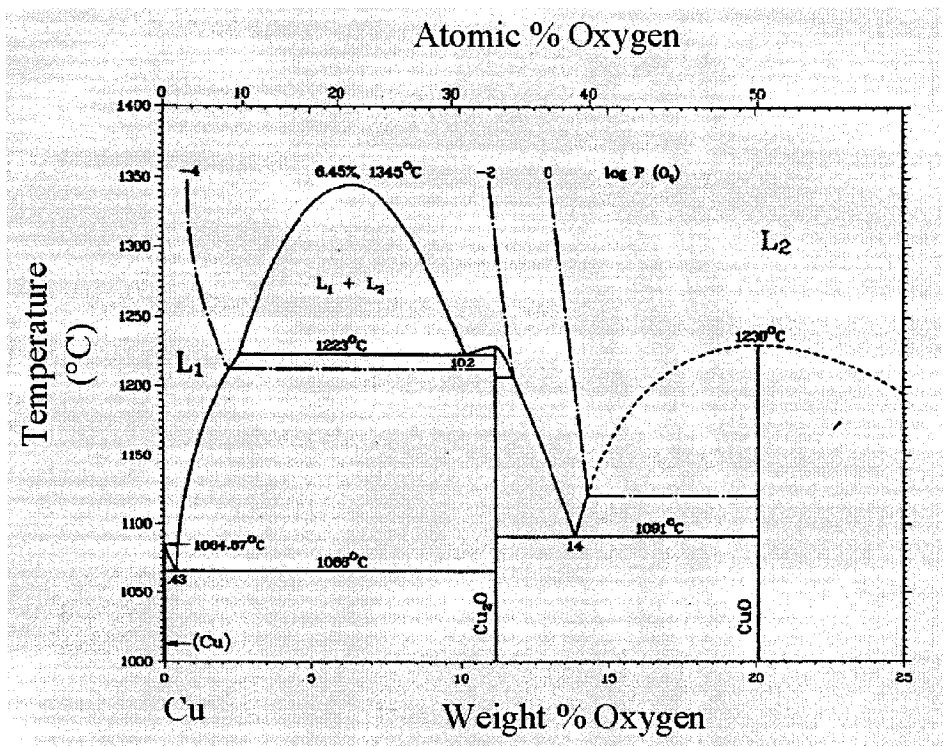


Figure 3.8 : Diagramme d'équilibre cuivre-oxygène, SFPE 2000

À la figure 3.8, nous pouvons constater que la formation de CuO débute pour des quantités d'au moins 12% d'oxygène et exactement à 20% d'oxygène, c'est du CuO seul. Ainsi, le Cu_2O se forme sur le métal suivi du CuO à l'interface avec l'oxygène. À haute température, les oxydes deviennent liquides, de même que le cuivre pur. Ce qu'il est important de noter, c'est que les températures de fusion des oxydes sont plus élevées que celle du cuivre pur. Dans un incendie, ce serait la surface extérieure du conducteur de cuivre qui serait exposée la première à de hautes températures, donc les oxydes doivent avoir pour rôle de ralentir un peu la fusion du composant. En fait, il faut se référer à la figure 3.9 suivante pour comprendre l'effet de l'oxygène sur le cuivre et sa dissolution possible.

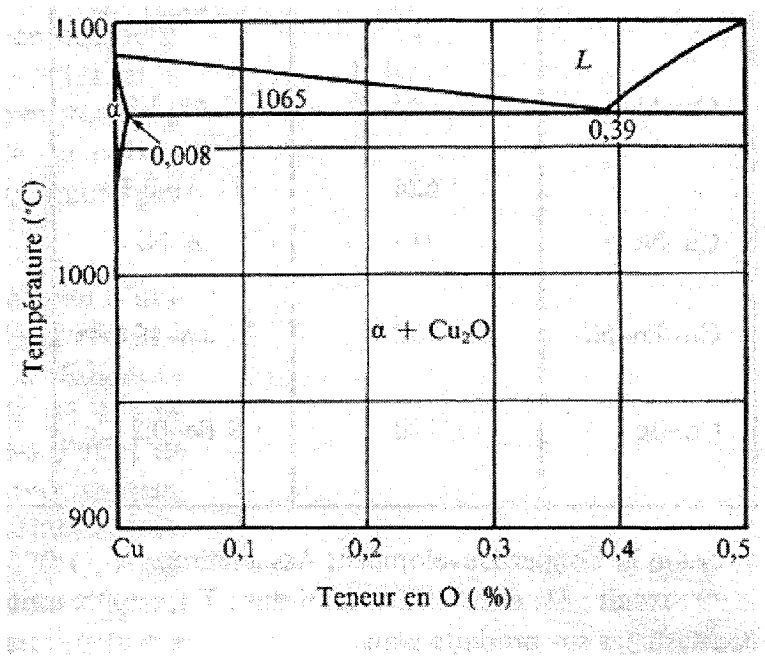


Figure 3.9 : Diagramme d'équilibre cuivre-oxygène (Des Matériaux 1986)

Il est possible de schématiser la formation et la croissance des oxydes sur le cuivre pur en utilisant la théorie présentée dans le livre de Birks et Meier (1983). En fait, pour un phénomène d'oxydation à haute température, où les deux réactants sont séparés par un produit de la réaction (oxyde), il faut utiliser comme prémisse que le transport électronique et ionique dans l'oxyde est accompagné de l'ionisation de la réaction frontière et de la formation d'un nouvel oxyde dans des sites dépendants du type de d'ion (cation ou anion). À l'interface Cu-Cu_2O, les ions de cuivre s'ionisent selon l'équation 3.23 qui tient de la théorie de Wagner.

$$Cu = Cu^{+} + 1é \tag{3.23}$$

Les ions de cuivre et les électrons à travers la couche de Cu_2O utilisent les sites de Cu vacants et les trous d'électrons. À l'interface Cu_2O/CuO, le Cu_2O est réduit par les ions cuivre et les électrons (équation 3.24).

$$Cu^{n+} + ne + CuO = Cu_2O \tag{3.24}$$

Dans ce cas, la valeur de n passe de 1 à 2. Si les ions de Cu sont mobiles dans la couche de CuO, ils vont migrer à travers de cette phase dans les sites vacants de Cu avec les électrons pour former l'interface CuO-gaz O_2 selon l'équation 3.25.

$$2Cu^{2+} + 4e + O_2 = 2CuO \tag{3.25}$$

À l'interface, l'oxygène s'ionise comme présenté à l'équation 3.26.

$$1/2O_2 + 2e = O^{2-} \tag{3.26}$$

De l'autre côté, il peut également y avoir diffusion de l'oxygène dans la phase CuO selon l'équation 3.27.

$$Cu^{2+} + O^{2-} = CuO \tag{3.27}$$

Comme la mobilité des défauts est plus importante dans la phase Cu_2O que dans la phase CuO selon Birks et Meier (1983), la couche de Cu_2O sera beaucoup plus épaisse que celle de CuO. Il est de mise de noter que les deux oxydes vont se former, même à de plus faibles températures. Dans le cas des incendies où des températures élevées sont obtenues, il y a justement formation de ces divers oxydes en surface des conducteurs de cuivre qui, initialement, ne sont pas oxydés. La figure 3.10 suivante schématise la croissance des couches d'oxydes sur le cuivre.

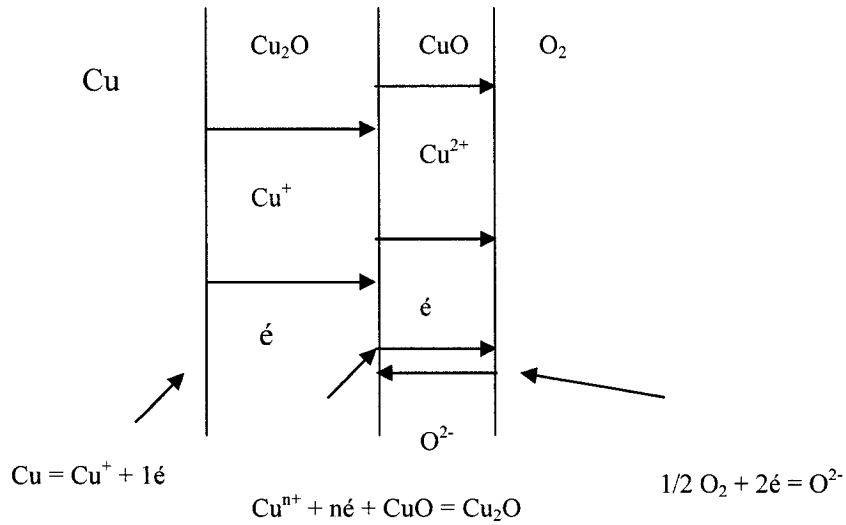


Figure 3.10 : Croissance des couches d'oxydes de cuivre (Birks et Meier 1983)

3.1.7 Oxydation du laiton

Puisque cet alliage est composé de deux métaux (cuivre et zinc), il y a formation de couches d'oxydes impliquant justement ces deux métaux. Voyons en détail la théorie de l'oxydation du laiton proposée par Kofstad (2000). Selon les travaux de *Dunn, Rhines et Nelson*, l'oxydation du laiton, pour des concentrations de moins de 10% de zinc, se produit de la même façon que le cuivre pur. Nous retrouvons une importante quantité de Cu_2O avec quelques agglomérations de CuO.

Lorsque la quantité de zinc augmente dans l'alliage, et plus précisément entre 10% et 20%, le taux d'oxydation diminue avec l'augmentation de la quantité de zinc. Quand les quantités de zinc dépassent les 20%, le taux d'oxydation devient indépendant de la quantité de zinc, et demeure ainsi constant bien qu'il y ait une augmentation de la proportion de zinc dans l'alliage. Lorsque les quantités de zinc dans l'alliage dépassent les 20%, l'oxydation crée principalement une couche de ZnO. Ainsi, nous pouvons constater que le zinc a une plus grande propension à s'oxyder que le cuivre, puisqu'il ne

suffit qu'une faible quantité de zinc dans l'alliage (20%) pour que tout le matériau se comporte comme le zinc pur de façon prédominante.

Toujours selon les travaux des chercheurs précités, il a été découvert qu'entre 10% et 20% de zinc dans le laiton, la composition de la couche d'oxyde change de façon importante. De plus, pour ces mêmes laitons comprenant des quantités de zinc mentionnées ci-haut, il a été démontré que la création des couches d'oxydes pouvait ne pas suivre une relation parabolique. Un exemple tiré du document de Kofstad (2000) montre, à la figure 3.11, un comportement non parabolique pour l'oxydation d'un laiton Cu-15%Zn à 700°C et 1 atm.

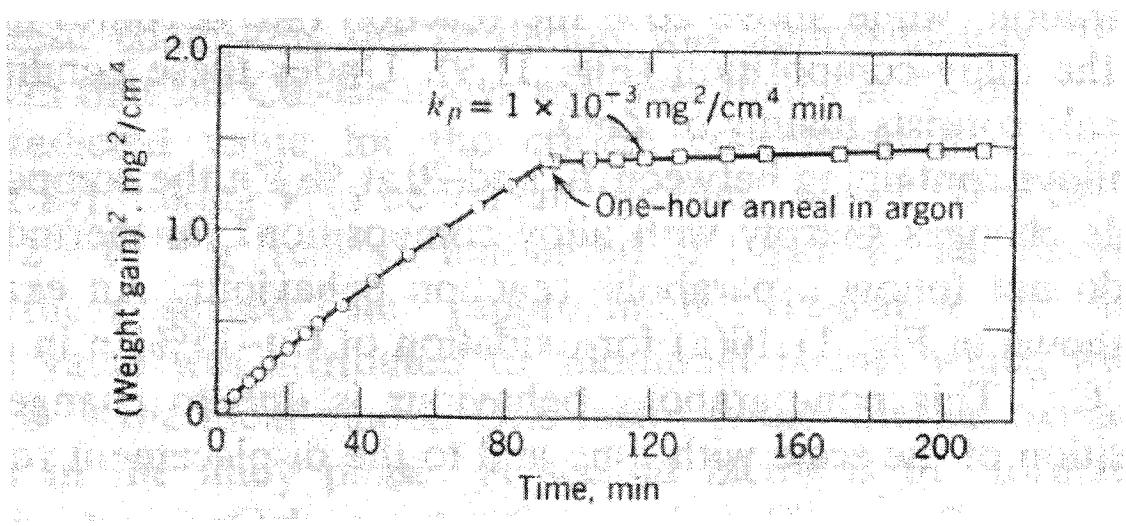


Figure 3.11 : Oxydation interrompue après 1 heure (Kofstad 2000)

En fait, cette déviation par rapport au comportement parabolique proviendrait du changement de la composition des oxydes avec le temps selon l'équation 3.28 suivante :

$$\text{Zn (dans l'alliage)} + Cu_2O = 2Cu + ZnO \qquad (3.28)$$

Les énergies de formation de ces deux oxydes sont respectivement de :

ΔG^{o}_{ZnO} = 60.5 kcal/mol

$\Delta G^{o}_{Cu_2O}$ = 23.7 kcal/mol

Ainsi, le Cu_2O se forme avant le ZnO, mais compte tenu du changement dans la valeur de la constante, il y a formation de ZnO, couche épaisse qui prend le dessus sur le Cu_2O formé au début, et la résultante est du ZnO. Les travaux de Wagner présentés par Kofstad (2000) ont même réussi à déterminer de façon précise qu'à des concentrations molaires de zinc de l'ordre de 15%, tout l'alliage se comportait comme du zinc, entraînant ainsi la formation de la couche de ZnO exclusivement. En ce qui à tait au laiton utilisé pour les pièces et dispositifs électriques, il comporte habituellement environ 15% de zinc et un peu plus, pour réduire les coûts. Nous devrions donc nous attendre à observer principalement un oxyde de zinc ZnO à la surface plutôt qu'un oxyde de cuivre.

CHAPITRE 4: EXPÉRIMENTAL

Suivant les différentes bases théoriques exposées aux chapitres précédents, il est maintenant possible d'établir une méthodologie d'expérimentation. Ainsi, deux environnements distincts permettent d'endommager les composants métalliques des systèmes électriques des bâtiments : le milieu généré par un incendie et la reproduction en laboratoire. Nous avons justement considéré ces deux situations totalement différentes, et leurs impacts respectifs sur l'interaction et le comportement des métaux afin de caractériser la nature des dommages ainsi créés. D'emblée, il est de mise de mentionner que ces deux environnements diffèrent sur plusieurs points dont un principal : le caractère non contrôlé d'un incendie, bien que son développement et sa croissance obéissent à certaines lois. Il n'existe d'ailleurs aucun ouvrage de littérature dont le but était de considérer et comparer l'influence d'un milieu d'incendie sur la caractérisation métallurgique des dommages observés aux composants électriques, le tout par rapport à celui d'essais en laboratoire.

Cependant, tout récemment, la caractérisation métallurgique d'un conducteur montrant un endommagement en son extrémité a été réalisée par Clarke (2006) afin de déterminer si les dommages résultaient d'une activité électrique ou d'une élévation en température. Il n'a toutefois pas été question d'essais en laboratoires pour confirmer ou infirmer les conclusions tirées de cette caractérisation.

Ainsi, pour chacun des endommagements étudiés dans ce mémoire, les essais ont impliqué des réactions simulées en laboratoire et d'autres générées lors d'un incendie. Le tableau 4.1 résume les différents paramètres d'essais considérés pour l'obtention des divers résultats.

Tableau 4.1 : Paramètres des essais d'endommagements thermiques et par courts-circuits

Endommagements thermiques	Endommagements par court-circuit
Échantillons prélevés sur des scènes d'incendie • Cuivre • Aluminium • Acier • Laiton	Échantillons prélevés sur des scènes d'incendie • Cuivre • Aluminium • Acier • Laiton
Échantillons de cuivre, d'aluminium, d'acier et de laiton affectés en laboratoire • Essais avec torche • Essais avec brûleur • Essais avec des métaux différents	Échantillons de cuivre, d'aluminium, d'acier et de laiton affectés en laboratoire • Essais à 120 volts • Essais à 240 volts • Mesures de la tension et du courant
Échantillons de cuivre, d'aluminium, d'acier et de laiton affectés par la chaleur d'un incendie contrôlé • Mesure de température • Utilisation d'accélérants	Échantillons de cuivre, d'aluminium, d'acier et de laiton affectés lors d'un incendie contrôlé • Mise sous tension à 120 volts • Mise sous tension à 240 volts

4.1 Endommagement thermique

L'endommagement thermique consiste, et son nom l'indique, à soumettre divers échantillons métalliques à des hausses de températures maintenues et suffisantes pour engendrer leur fusion partielle et/ou complète. Ce phénomène, purement thermique et n'impliquant alors nullement une activité de nature électrique, est couramment rencontré lors des incendies. En effet, il arrive fréquemment que des appareils électriques se retrouvent hors tension suite à l'opération des dispositifs de protection qui cesse par conséquent, l'alimentation électrique de ceux-ci malgré le fait qu'ils demeurent dans un secteur où l'incendie fait rage. Les températures atteintes au sein du brasier seront alors suffisantes pour engendrer la fusion de ces composants, leur infligeant des dommages thermiques.

Suite à l'incendie, l'investigateur examinant les composants des systèmes électriques en vue de déterminer leurs comportements et réactions notera des dommages en surfaces, lesquels devront être caractérisés judicieusement afin de déterminer leur nature. Il arrive donc que ces endommagements purement thermiques soient retenus comme étant des indices d'une activité électrique. Voilà la raison principale pour laquelle ce volet est traité dans ce mémoire.

4.1.1 Endommagements thermiques en laboratoire

Pour simuler le plus judicieusement possible la fusion d'un composant métallique en laboratoire, nous avons eu recours à une torche au propane afin de fournir un apport de chaleur considérable. De fait, les températures mesurées ont excédé les 1300°C. Ainsi, divers échantillons comme des conducteurs d'acier, de cuivre, d'aluminium et des composants de laiton ont été soumis à un tel environnement. Mentionnons que ces divers métaux ont été impliqués seuls et en présence de métaux semblables ou dissimilaires et ce, jusqu'à ce que la fusion complète et, ou partielle survienne.

De ce qui précède, des câbles NMD-90 de calibre 12AWG et 14AWG dont les conducteurs étaient en cuivre ont été soumis seuls à cet environnement. La gaine de ces câbles était faite de polyéthylène. Dans certains cas, de l'aluminium en fusion a été déposé sur ces conducteurs de cuivre afin d'initier des interactions entre ces deux métaux. L'aluminium provenant de câbles à gaine tressée composés de conducteurs en aluminium de calibre 14AWG, ainsi que de la gaine métallique des câbles de type armé. De plus, des conducteurs d'acier de calibre 12AWG provenant de câbles triplex dont ils servaient de neutre porteur, ont également été impliqués dans cet environnement. Nous avons forcé l'interaction entre ceux-ci et des brins d'aluminium, leur infligeant ainsi des dommages en surface. Quant au laiton, il a aussi été soumis à cet environnement, seul

et en présence d'étain, métal avec lequel il est fréquemment couplé lors de la fabrication de raccords et fiches (figure 4.1).

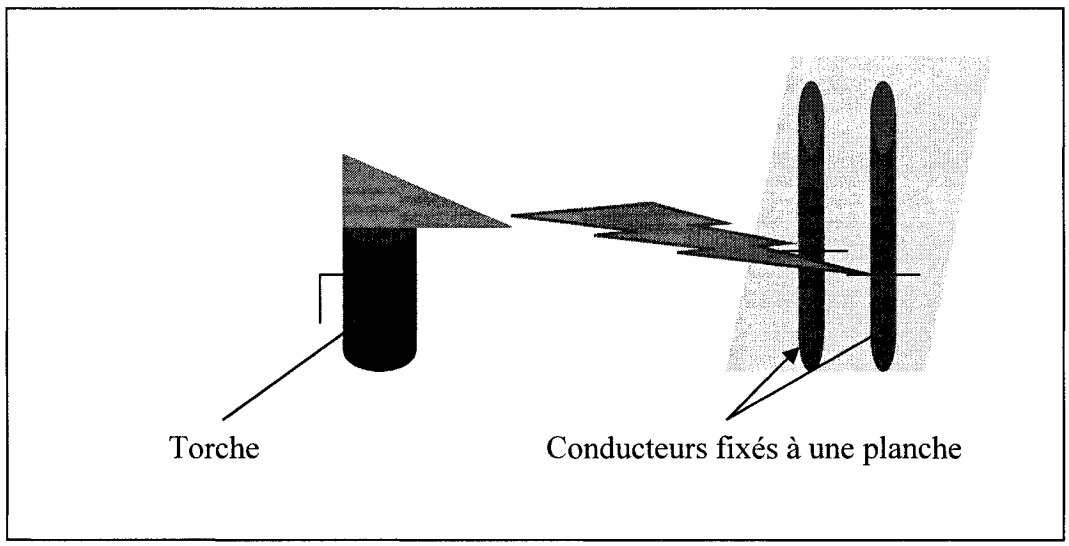


Figure 4.1 : Schéma du montage des endommagements thermiques

En ce qui concerne les cordons souples, lesquels sont constitués de brins de cuivre, ils ont également été affectés par une chaleur générée par une torche, laquelle a permis leur fusion purement thermique. En fait, en plus de l'utilisation de la torche, ils ont été endommagés avec un brûleur de type *Bunsen.* Ils n'ont pas été chauffés en présence d'autres métaux puisque, de par leurs applications et utilisations, ils n'interagissent pas avec d'autres métaux. Plus précisément, les brins de cuivre des cordons souples sont recouverts d'une gaine plastique et se retrouvent habituellement positionnés dans les contenus des bâtiments à un bas niveau, où ils ne sont guère susceptibles d'être endommagés par d'autres métaux.

Pour chacun des essais, les températures ont été mesurées à l'aide de thermocouples reliés à un acquisiteur de données, lesquelles variaient majoritairement entre 600°C et 1 000°C. Le chauffage terminé, les échantillons ont été trempés dans l'eau distillée pour accélérer leur refroidissement et recréer la situation qui a prévalu

lors de l'extinction de l'incendie. Les divers métaux étaient par la suite isolés et observés au microscope métallurgique (stéréomicroscope) afin d'identifier et de qualifier les zones d'endommagement. La figure 4.2 suivante illustre le montage effectué pour la réalisation de ces endommagements thermiques sur divers métaux.

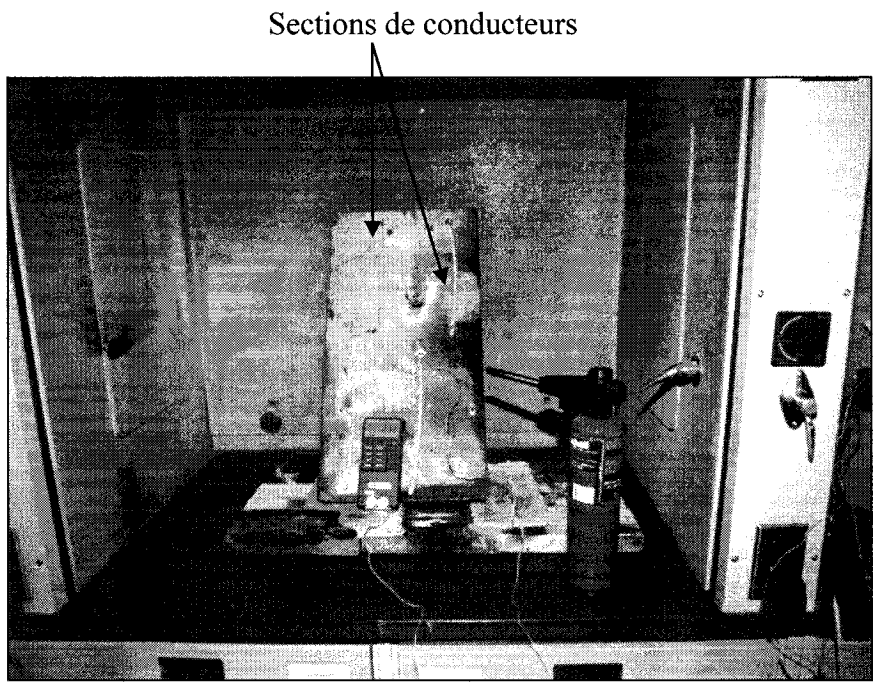


Figure 4.2 : Montage de l'évaluation des dommages thermiques fait aux laboratoires de Experts-Conseils CEP inc (2003)

Précisons que lorsqu'il s'agissait de créer des interactions entre deux métaux, le métal de base (celui des conducteurs) était chauffé dans la gaine du câble (plastique ou métallique) ainsi que l'autre métal (métal d'apport), ce dernier chauffé lorsque maintenu dans une pince. Le métal d'apport en fusion, ayant une température de fusion inférieure, se déposait alors sur celui de la base préalablement chauffé et l'ensemble était encore chauffé par la torche. Par la suite, lesdits métaux étaient refroidis sous l'eau pour représenter le phénomène qu'est l'extinction lors d'un incendie.

4.1.2 Endommagements thermiques lors d'un incendie

Tout comme pour les essais faits en laboratoire, les dommages thermiques générés lors d'un incendie avaient pour but de créer des endommagements purement liés à un apport de chaleur considérable, sans impliquer que ces composants soient énergisés. Pour réaliser ce projet, différentes sections de câbles de cuivre et d'aluminium dont les caractéristiques sont demeurées les mêmes que celles précitées, ont été placées dans des pièces où un incendie allait être initié par nous-mêmes. La figure 4.3 montre justement un salon où nous avions initié un incendie par l'application de flammes dans une causeuse préalablement enduite de varsol. Les câbles avaient été placés sur ladite causeuse.

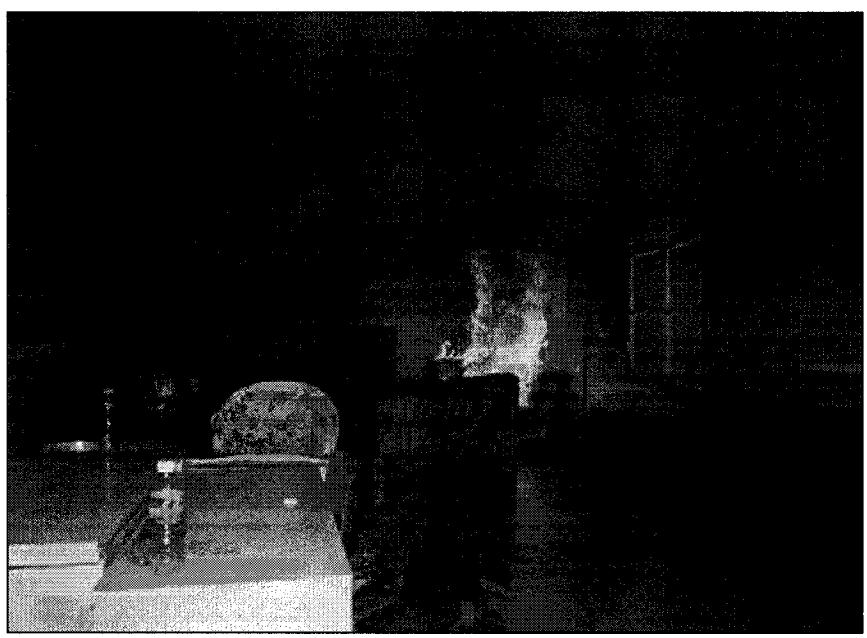


Figure 4.3 : Initiation d'un incendie dans une causeuse par Experts-Conseils CEP inc. (2003)

Nous avions laissé libre cours à la progression de l'incendie jusqu'à ce que la pièce soit totalement en flammes, comme montrée à la figure 4.4, suite à quoi plusieurs

équipes de pompiers ont éteint le brasier. Il faut noter que lors de la naissance et du développement de l'incendie, des thermocouples avaient été placés dans les pièces, lesquels étaient liés à un système d'acquisition de données, afin de noter les hausses de températures atteintes dans ce milieu d'incendie.

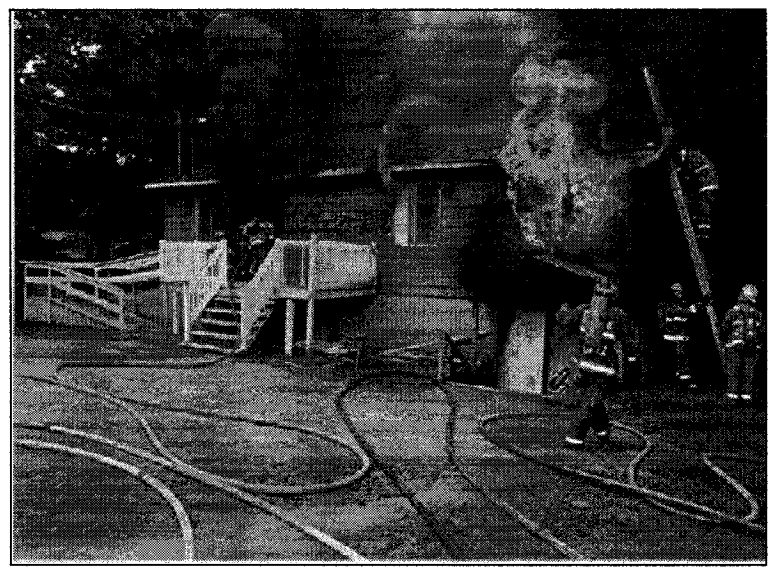
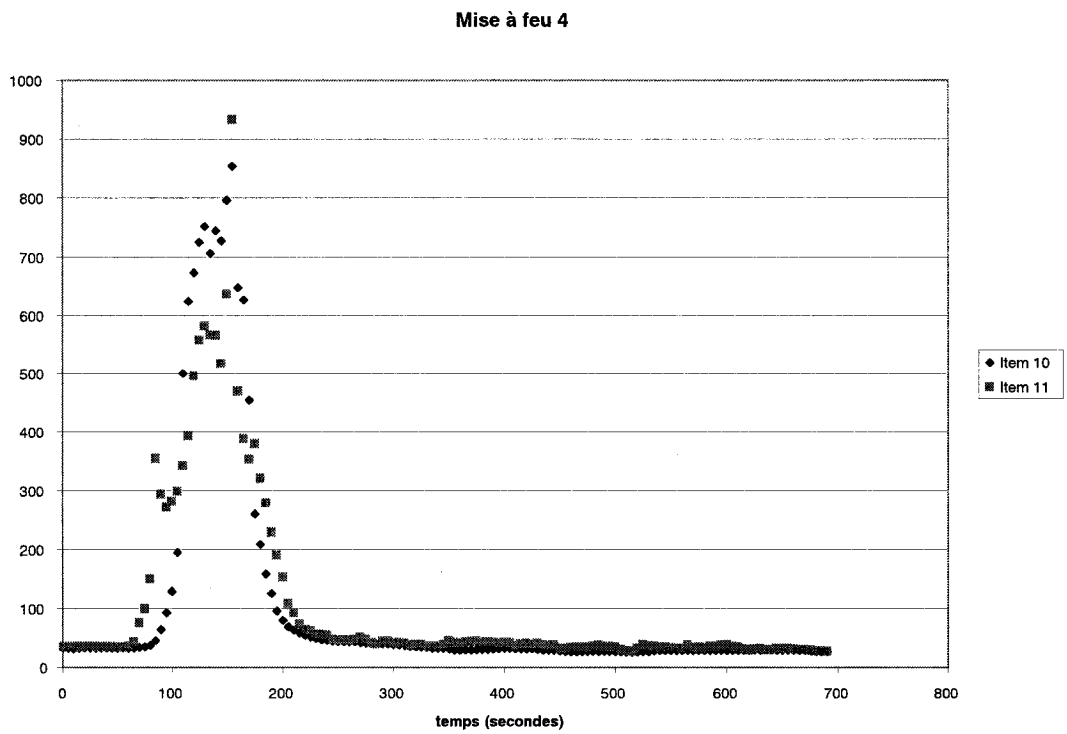


Figure 4.4 : État de l'incendie avant son extinction, mise à feu de Experts-Conseils CEP (2003)

C'est par l'examen des données thermiques enregistrées lors des essais de mise à feu, lesquelles ont été converties sur graphique pour l'obtention de courbes décrivant les hausses de températures lors d'un incendie, que nous avons pu déterminer les températures atteintes au sein du brasier et par conséquent, les températures auxquelles les divers matériaux ont été soumis.

Lors de ces mises à feu contrôlées, des températures maximales de l'ordre de 1000°C ont été rencontrées dans certaines pièces où l'incendie avait été initié avec des produits accélérants. En fait, les produits accélérants entraînent une combustion et une carbonisation très rapides, par le fait que ceux-ci possèdent une phase vapeur qui

s'enflamme instantanément, donc plus rapidement que les combustibles solides. Il est important de noter que puisque cette demeure était désaffectée, le contenu calorifique des pièces était moindre car il n'y avait que très peu de mobilier. Dans ces circonstances, les températures générées par les combustibles se dégradant s'en trouvent amoindries. Cependant, le fait d'utiliser un produit accélérant pour initier un incendie permet de générer rapidement une importante quantité de chaleur transmise au milieu, ce qui normalement aurait pris beaucoup plus de temps. Le graphique 4.1 suivant illustre les températures atteintes lors de la mise à feu numéro 4, soit celle avec une initiation d'incendie dans une causeuse du salon avec l'utilisation de produits accélérants.



Graphique 4.1 : Températures atteintes lors de la mise à feu #4 par Experts-Conseils CEP (2003)

4.2 Endommagements par court-circuit

Pour générer des dommages de cette nature, diverses sections de câbles et autres composants ont été mis sous tension à des voltages variant de 120 volts à 240 volts. Le choix de ces valeurs de tension découle principalement du fait que ce sont celles habituellement retrouvées dans un bâtiment pour alimenter les différents appareils électriques. Alors que des sections d'environ 30 centimètres de longueur de câbles étaient installées dans une enceinte fermée, nous avons retiré la gaine protégeant certains des conducteurs afin de permettre le contact (fortuit) entre ceux-ci.

En fait, tout dépendant des essais réalisés à 120 volts et 240 volts, lesquels influençaient le nombre de conducteurs sous tension, nous avons forcé un contact fortuit entre deux conducteurs à des potentiels différents, engendrant alors des arcs électriques et même des courts-circuits. Plus précisément, les arcs ont été amorcés entre le conducteur vivant et celui de la mise à la terre pour les essais à 120 volts alors que ceux-ci ont impliqué les deux conducteurs vivants ensemble pour les essais à 240 volts.

En milieu d'incendie, nous avons récupéré des portions de câbles électriques présentant des dommages attribuables à une activité électrique. Pour ce faire, ce sont ceux dont l'examen du circuit et de sa protection ont confirmé qu'ils avaient été sollicités au cours de l'incendie qui ont été recueillis.

4.2.1 Endommagements par court-circuit en laboratoire

Pour ce faire, plusieurs câbles de calibre 12AWG et 14AWG, NMD90 dans le cas du cuivre et 12AWG dans le cas de l'aluminium ont été sélectionnés. Nous avons prélevé des sections mesurant environ 30 centimètres de longueur pour la réalisation de ces essais. Mentionnons que ces sections de câble comportaient une gaine extérieure de

PVC ainsi que des gaines protectrices internes, sur les conducteurs, faites en nylon. Au centre de ces sections, nous avons dénudé une petite région de 2,52 centimètres de longueur, en plus des extrémités pour en faciliter le branchement. Le but premier de cette opération était de révéler les conducteurs du câble afin de forcer un contact.

Nous avons donc branché, une à une, les sections de câbles, et nous les avons ainsi raccordées à une charge, soit à une ampoule de 50 Watts dans un socle. Ce circuit était protégé par un disjoncteur de 30 ampères. Afin de confiner les projections de métal en fusion générées lors des arcs électriques, le branchement de chacune des sections a été réalisé dans une enceinte fermée, soit à l'intérieur d'une boîte dont le couvercle de verre permettait de visualiser les arcs électriques et de les filmer. Par la suite, les conducteurs dans la zone dénudée ont été légèrement rapprochés sans toutefois engendrer un contact et une fine poudre de carbone (poudre conductrice) a été déposée sur ceux-ci pour servir de milieu conducteur aux arcs électriques (figure 4.5).

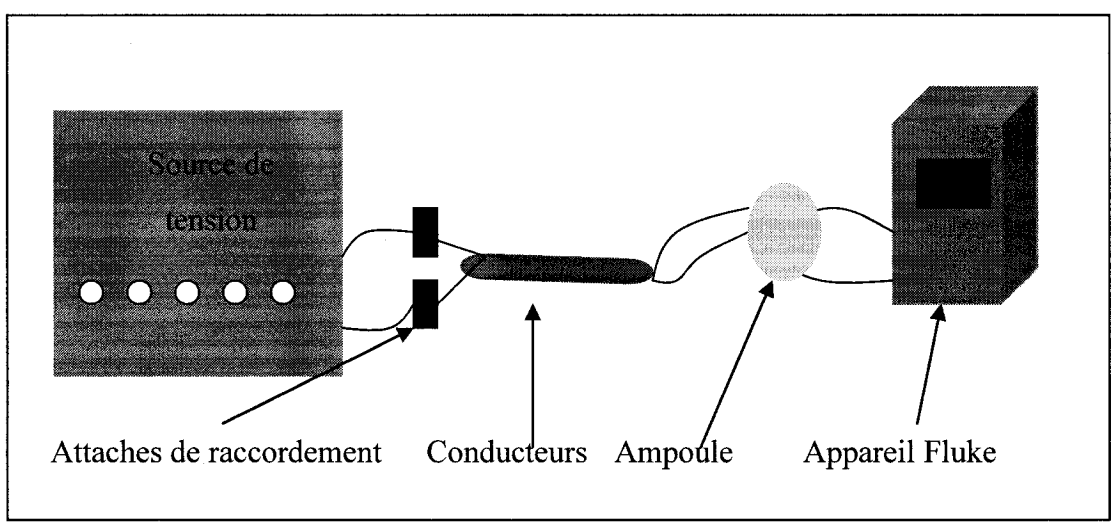


Figure 4.5 : Schéma du montage pour l'acquisition de données lors des courts-circuits

Afin de recueillir les variations de courant et de tension occasionnées par les arcs électriques et les courts-circuits, nous avons eu recours à un appareil spécialement

conçu pour mesurer ces paramètres. En effet, l'appareil *FLUKE* en question permettait l'acquisition de données à intervalle de 7 millisecondes, de sorte qu'il pouvait enregistrer les hausses ultra rapides de courant lors d'un court-circuit (figure 4.6).

Figure 4.6 : Appareil *Fluke* pour l'enregistrement des données des circuits, lors du montage chex Experts-Conseils CEP (2005)

Il faut garder à l'esprit qu'un court-circuit est un phénomène extrêmement rapide qui peut facilement se produire en moins d'une demi-seconde, d'où l'importance d'utiliser des appareils précis. Grâce à ses pinces ampèremétriques placées autour de chacun des brins (noir et blanc) du câble, l'appareil *FLUKE* reproduit sous forme d'onde la variation de l'intensité (le courant). Il ne faut pas penser que puisque le dispositif de protection contre les surintensités n'est que de 15 ampères ou 30 ampères, l'intensité atteinte sera de cet ordre. Les intensités atteintes lors d'arcs électriques peuvent atteindre près de 1000 ampères, selon la littérature.

Ainsi, les figures 4.7 et 4.8 montrent une vue générale du montage en question, réalisé au laboratoire de Experts-Conseils CEP, en 2005. Il est de mise de préciser que

la masse des échantillons (sections de câbles) avait été mesurée avant la réalisation des divers essais, ainsi que suite à ces activités pour calculer la perte de masse de ce phénomène, et tenter de faire une corrélation entre l'énergie d'un court-circuit et la masse vaporisée.

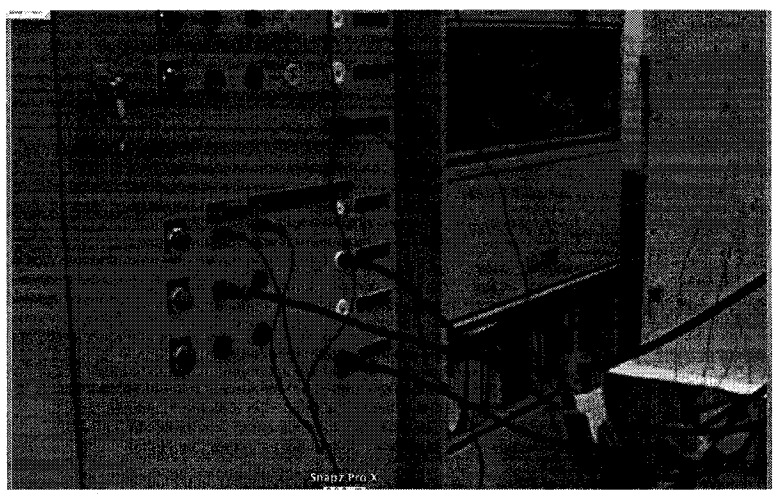


Figure 4.7 : Panneau de contrôle pour les paramètres électriques, Experts-Conseils CEP (2005)

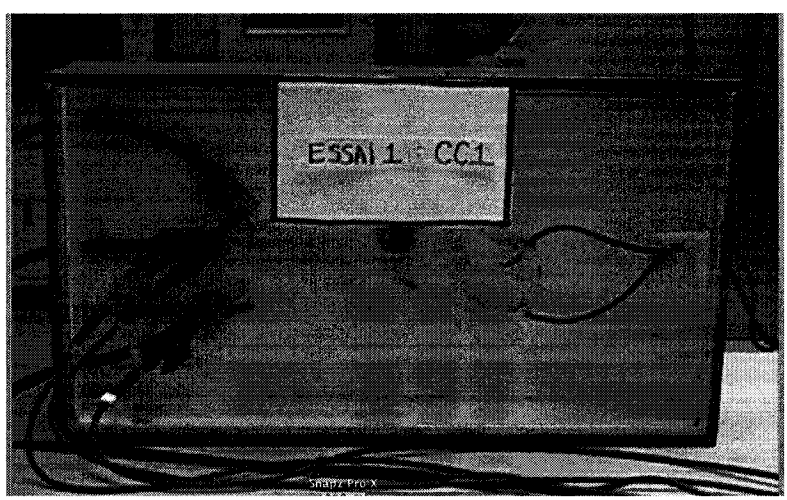


Figure 4.8 : Montage des sections de conducteurs, Experts-Conseils CEP (2005)

Dans le cas d'arcs électriques impliquant du laiton, nous avons mis sous tension des fusibles dont les extrémités étaient constituées de laiton, et nous avons engendré des courts-circuits en effectuant un contact entre ces pièces sous tension et d'autres faites d'étain et n'étant pas sous tension.

En ce qui a trait à l'acier, le montage a été quelque peu différent. En fait, les essais réalisés avec l'acier avaient pour but de noter l'interaction électrique entre l'acier et l'aluminium, le tout basé sur le fait que cette situation est fréquemment rencontrée lors de l'examen des câbles électriques suite à un incendie et plus particulièrement lors des observations réalisées sur les câbles d'alimentation. Nous avons donc utilisé les conducteurs des câbles dits triplex, soient ceux alimentant les bâtiments. Il est de mise de mentionner que ceux-ci sont constitués de deux conducteurs multibrins en aluminium recouverts d'une gaine plastique et d'un troisième conducteur présentant un brin en acier (âme), entouré de plusieurs brins d'aluminium, ce dernier agissant comme neutre porteur.

Nous avons laissé le brin d'acier au centre de tous les brins d'aluminium, tel qu'il se retrouve normalement lorsqu'il est utilisé comme neutre porteur dans les câbles d'alimentation électrique aérienne. Ce conducteur ayant une âme en acier, a été mis sous tension, et un contact forcé a été induit entre celui-ci et un autre conducteur fait uniquement de brins d'aluminium.

Finalement, les derniers essais en laboratoire ont impliqué des conducteurs multibrins de cuivre provenant de sections de cordons souples. Tous les essais ont engendré un contact fortuit entre deux des trois conducteurs multibrins du cordon souple, lequel a été permis grâce à l'endommagement mécanique de la gaine. Plus précisément, la fiche mâle du cordon souple a été branchée dans une prise de courant à 120 volts, dont la protection était un disjoncteur de 15 ampères. Une ampoule de 50 Watts était alimentée par ce circuit. La partie centrale de la gaine a été endommagée

pour révéler les conducteurs internes dont les gaines protectrices ont également été retirées en partie. De la poudre de carbone a permis l'amorce de l'arc électrique. De plus, nous avons également fait court-circuiter certaines sections dudit cordon souple par l'apport externe de chaleur par un brûleur situé sous le cordon alors alimenté.

4.2.2 Endommagements par court-circuit en milieu d'incendie

Plusieurs échantillons métalliques ont été affectés alors qu'ils étaient sous tension lors de nos différentes mises à feu. En fait, les traces de court-circuit sur les câbles de cuivre et les cordons souples de cuivre ont pratiquement toutes été sélectionnées suite à ces mises à feu où ces différents items étaient sous tension, exactement comme ils le sont dans un bâtiment régulier. Les flammes dégradant leurs isolants ont vite permis l'amorce d'arcs électriques entre les différents brins de ces composants, par le média qu'est le carbone issu de la pyrolyse.

Quant aux composants d'acier et d'aluminium, ils ont été prélevés dans des bâtiments incendiés. En fait, leur localisation et l'étude du comportement du système électrique permettaient aisément de déterminer que ces dommages étaient relatifs à des activités de nature électrique.

4.3 Examen macroscopique

Dans un premier temps, chacune des régions endommagées a été identifiée, mesurée, et décrite en détails. En fait, la morphologie des dommages a été étudiée attentivement pour en tirer le maximum d'informations relativement aux dépressions, protubérances, perte et gain de métal. Le nombre de brins et conducteurs affectés a été noté, tout comme la localisation des dommages sur chacun d'eux. De plus, nous avons porté une attention particulière au fini de surface, aux décolorations et à la présence

d'oxydes. Il est important de mentionner que cette étape qu'est l'observation macroscopique constitue la technique la plus couramment utilisée, encore de nos jours, pour déterminer la nature des dommages.

4.4 Examen microscopique

Afin de caractériser précisément les endommagements observés en surface des conducteurs, chacune des régions endommagées a été observée à plus fort grossissement. En fait, ces observations permettent d'identifier différents aspects non visibles à des grossissements grossiers, tels les structures de solidification, les strates d'oxydes et les points de contacts lors des arcs électriques.

4.4.1 Métallographies

Cette technique est relativement difficile à réaliser sur des conducteurs de faible calibre, sans en perdre les protubérances créées lors des arcs électriques. Cependant, elle permet de révéler le comportement et les résultats de l'interaction entre des conducteurs découlant des courts-circuits. Plus précisément, les métallographies transversales détaillent les régions du conducteur métamorphosées lors des arcs électriques. Quant aux métallographies longitudinales, elles ne permettent que de caractériser les changements microstructuraux liés principalement à la croissance des grains conséquemment à un apport de chaleur extérieur, compte tenu du faible diamètre des conducteurs.

4.4.2 Examen au microscope électronique à balayage

Finalement, cette technique d'observation est sans doute la plus utile pour caractériser les dommages en surface des conducteurs. Elle permet d'identifier, à fort grossissement, la topographie des endommagements, les structures de solidification, les oxydes, les changements brusques en surface et les lieux de projections de métal

résultant de l'état plasma lié aux arcs électriques. En définitive, elle révèle des indices qui ne sont qu'observables à fort grossissement et qui sont associés à la nature même des dommages.

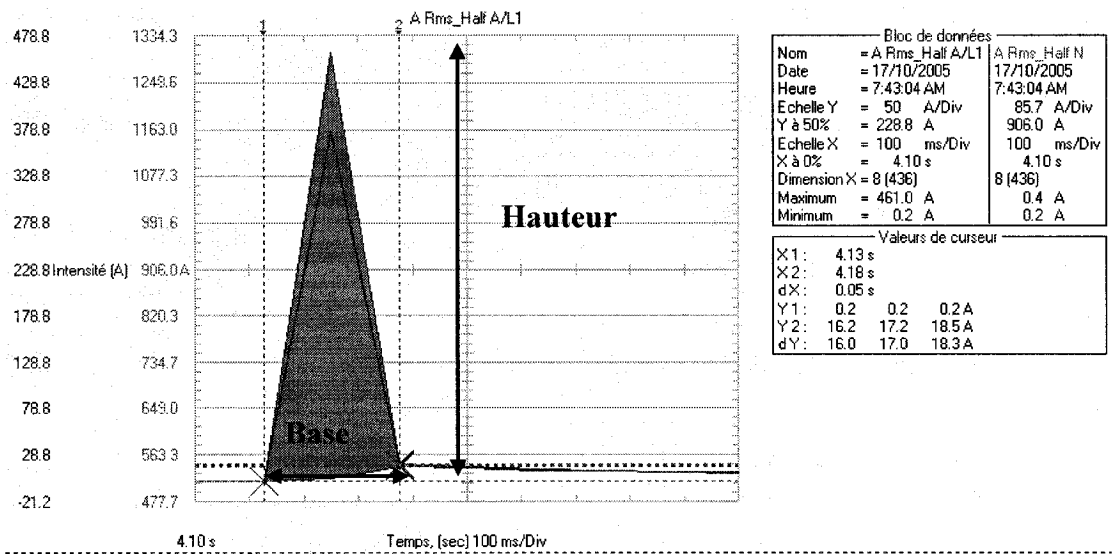
4.5 Calculs des énergies de courts-circuits

Pour chacun des essais de court-circuit fait en laboratoire sur des sections de câbles de cuivre et d'aluminium, les masses initiales desdites sections ont été mesurées à la balance. Suite à la prise de masse, les conducteurs ont été fixés à l'intérieur de l'enceinte montrée à la figure 4.8. Les extrémités de gauche des conducteurs ont été raccordées à la source de tension alors que celles de droite ont servi à raccorder, et par le fait même à alimenter une ampoule. Les pinces de l'appareil *Fluke* ont été branchées aux divers points d'attache des conducteurs afin de recueillir les signaux que sont la tension et le courant de court-circuit. Dans chacun des cas, l'appareil était calibré en fonction de la tension. Suite aux divers essais, les masses des échantillons ont été mesurées de nouveau afin d'en tirer une différence qualifiée de perte de masse.

Suite à la réalisation des essais de court-circuit, les différentes données de l'appareil *Fluke* ont été traduites sous forme de graphique illustrant l'intensité du court-circuit en fonction du temps de court-circuit. Le graphique 4.2 montre un exemple typique de ces courbes obtenues grâce à l'appareil. Quant à la tension des courts-circuits, celle-ci ne variait pratiquement pas et demeurait sensiblement la même tout au long du phénomène. D'ailleurs, les graphiques de la tension démontraient l'absence de variation de ce paramètre. Un exemple typique est présenté au chapitre 5.

Grâce aux valeurs de la variation de l'intensité en fonction du temps, il est possible de mesurer l'aire sous la courbe du graphique 4.2 en utilisant la formule de l'aire d'un triangle, soit la multiplication de la base par la hauteur, le tout divisé par

deux. Par la suite, compte tenu de la formule de la puissance qui se traduit par P=VI où P est la puissance, V la tension et I, l'intensité et de la conversion d'unités considérant qu'un joule vaut un watt-seconde, il est possible d'obtenir le nombre de joules de chacun des courts-circuits et par conséquent, les valeurs d'énergies. Un exemple de ce calcul figure à l'annexe 1 de ce mémoire.



Graphique 4.2 : Variation de l'intensité en fonction du temps lors d'un court-circuit

En plus des valeurs expérimentales ainsi calculées, nous avons évalué les énergies de court-circuit grâce aux valeurs théoriques. Plus précisément, en utilisant les valeurs des capacités calorifiques des divers métaux à pression constante, ainsi que leurs enthalpies de fusion et d'évaporation, les énergies théoriques associées à chacun des essais ont également été déterminées (voir annexe 1).

En définitive, toutes ces étapes d'évaluation et d'analyses avaient pour but principal de tirer des évidences physiques et métallurgiques permettant de caractériser les dommages et de les différencier.

CHAPITRE 5: RÉSULTATS

L'ensemble des résultats est présenté dans ce chapitre sous forme de tableaux et de figures. Des commentaires succincts viennent aider à la description, la compréhension et à l'interprétation de ces résultats.

Ainsi, la section 5.1 concerne les résultats des dommages purement thermiques créés sur divers métaux seuls. De plus, elle explore les réactions toujours thermiques qui sont engendrées par l'interaction de plusieurs métaux ensemble, à haute température. Par conséquent, cette section traite de l'impact et de la traduction de ces interactions sur lesdits métaux. La section 5.2, pour sa part, présente les divers dommages observés sur des métaux suite à une activité électrique. En fait, elle tient compte de l'interaction de deux composants semblables ou dissimilaires à des potentiels différents, afin de produire des arcs électriques ou courts-circuits se traduisant justement par des signes objectifs discernables sur les métaux.

De fait, comme ces expériences sont reliées entre elles, il ne sera possible de faire les corrélations, la caractérisation complète et les discussions qu'après avoir présenté tous les résultats. L'étape de synthèse et d'analyse sera donc décrite au chapitre suivant, soit au chapitre 6.

5.1 Endommagements thermiques

Que nous soyons en présence d'un seul métal ou d'une combinaison de métaux dissimilaires, ceux-ci demeurent sujets à des endommagements purement thermiques lors d'un incendie puisque la température environnante augmente et peut même atteindre leur température de fusion. Ainsi, cette section concerne les divers dommages, par fusion thermique, observés sur de nombreux câbles et conducteurs électriques, lesquels n'étaient pas alimentés, donc hors tension, lors de la création des

endommagements. Pour ne faire qu'un bref rappel sur la méthode, certains métaux ont été altérés par la chaleur en laboratoire alors que d'autres l'ont été suite à des hausses de température générées par un incendie dont nous avions le contrôle pour l'extinction. Tous ces composants n'ont subi aucun dommage relié à une activité électrique et n'étaient d'ailleurs pas branchés lors des essais .

En premier lieu, les résultats des endommagements par fusion des métaux purs et alliages sont présentés, dont notamment ceux concernant le cuivre, l'aluminium, l'acier et le laiton. Par la suite, ce sont les dommages découlant de l'interaction de métaux différents qui sont traités dans cette section, et les diverses caractéristiques physiques qu'engendrent ces interactions. En dernier lieu, une comparaison entre les différents types d'endommagements est réalisée.

5.1.1 Fusion du cuivre solide

Comme il a été décrit précédemment dans ce document, la plupart des conducteurs de cuivre solides ne fusionnent pas thermiquement lors d'un incendie, puisque les températures moyennes au sein du brasier sont de l'ordre de 800°C, soit inférieures à la température de fusion du cuivre. Cependant, lors d'incendies d'une ampleur telle qu'ils détruisent tous les matériaux combustibles de la structure et du contenu des bâtiments, des températures supérieures à 1083°C peuvent être atteintes. Dans ces conditions particulières, nous retrouvons des composants de cuivre portant des endommagements de nature thermique.

D'emblée, il est de mise de spécifier que la morphologie des dommages thermiques faits en laboratoire correspond en tout point à celle observée sur les échantillons endommagés en milieu d'incendie. En effet, la coloration est semblable et la localisation des régions d'endommagements est comparable. En fait, dans les deux

cas, celles-ci peuvent s'étendre sur une longueur appréciable du conducteur, ou avoir lieu plutôt localement. La section 5.1.1.1 suivante fait état de l'ensemble des résultats des endommagements thermiques observés sur les conducteurs de cuivre, et dresse les principales caractéristiques de ceux-ci, tant pour les résultats obtenus suite aux essais en laboratoire que pour ceux découlant des échantillons prélevés sur des sites d'incendie.

5.1.1.1 Examens macroscopiques et microscopiques

Les résultats des endommagements thermiques infligés aux divers conducteurs de cuivre sont présentés aux figures 5.1 à 5.4. Il est de mise de noter que ces détériorations en surface des conducteurs n'ont été possibles que suite à des hausses de températures dépassant les 1083°C, soit à des températures excédant celle de fusion du cuivre. De fait, les zones portant des dommages correspondaient à celles où la température locale dépassait la valeur précitée. Autant les dommages relatifs aux essais en laboratoire que ceux engendrés par la température d'un incendie n'affectaient que des régions précises des conducteurs. Ainsi, nous pouvons avancer que la réaction entre les conducteurs et le milieu thermique était similaire.

(a) (b)

Figure 5.1 : Dommages thermiques sur des conducteurs de cuivre (a) créés en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2003) et (b) récupérés sur une scène d'incendie

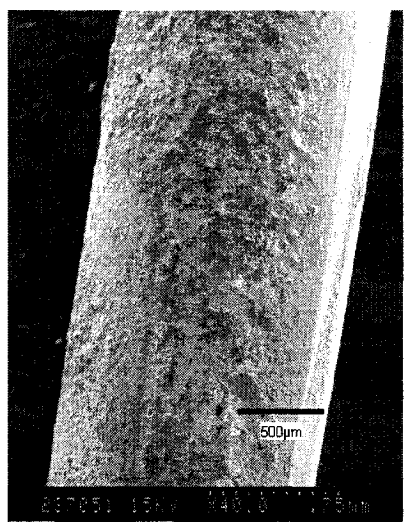


Figure 5.2 : Présence d'oxydes (surface rugueuse) sur un conducteur de cuivre endommagé thermiquement suite à un incendie (2003)

Une comparaison de la topographie de la surface du conducteur de cuivre par rapport à l'état initial révèle que la surface a été soumise à une succession de changements, de la coloration au fini. En fait, comme il a été discuté au chapitre 3, les

hautes températures ont permis la croissance des oxydes de cuivre qui ont plus ou moins adhéré à la surface. Les lignes liées à la mise en forme, soit au tréfilage, ont disparu dans les zones montrant des dommages. Les oxydes de cuivre, en plus d'être de couleur différente que celle du cuivre, ont une texture également différente, de sorte que le fini de surface du conducteur s'en est trouvé modifié.

La chaleur peut également engendrer des dommages s'étendant sur une certaine longueur du conducteur (figure 5.3), ou créer des zones de morphologie plutôt arrondie sur les conducteurs. En fait, dans les deux cas, la surface du conducteur directement à proximité de la région endommagée montrera également une texture différente de l'état initial et surtout, celle-ci se retrouve recouverte d'oxydes. Il y a altération de la surface du conducteur de part et d'autre de la région fusionnée, de sorte que le fini de surface du conducteur ne porte plus de lignes de tréfilage. Ces dommages ne sont donc pas ponctuels et localisés directement à côté d'une section de conducteur saine et présentant encore ses caractéristiques initiales et une coloration brillante. Cette situation est tout à fait normale puisqu'elle est due au développement et à la croissance, à haute température, d'oxydes en surface des conducteurs de cuivre (figure 5.4).

Plus précisément, les hausses importantes de températures du milieu, lesquelles affectent la surface des conducteurs de cuivre à un point tel qu'elles entraînent même la fusion, permettent la croissance des divers oxydes de cuivre. À cet effet, nous constatons que la croissance des oxydes est plus importante lorsqu'il y a fusion partielle de la surface du conducteur que lorsque celle-ci demeure solide. C'est pourquoi ils recouvrent habituellement les régions fortement affectées par la chaleur. À plus fort grossissement, il peut même être possible de distinguer les différents types d'oxydes sur le cuivre, lesquels ont crû sous forme de cristaux plutôt cubiques (CuO) ou de trapèzes (Cu_2O). Cette différenciation et la création de ces oxydes sera discutée au chapitre 6 suivant.

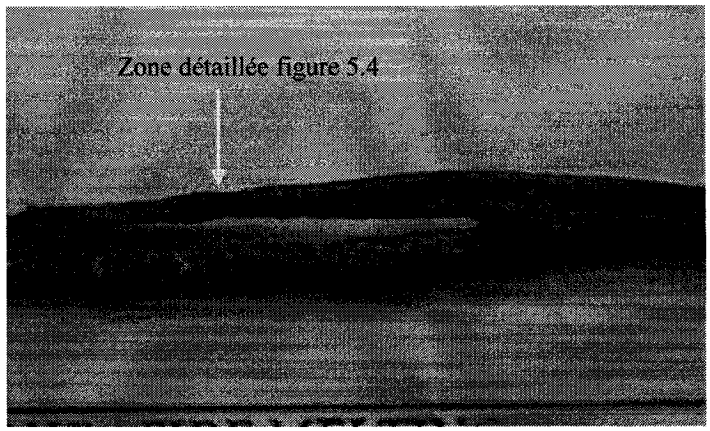
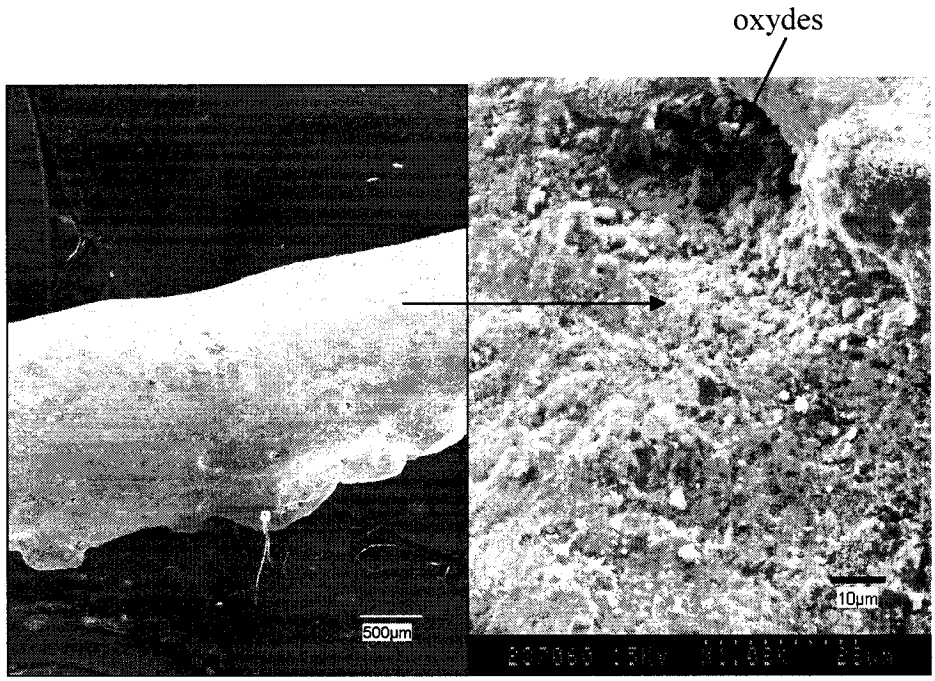


Figure 5.3 :Dommages engendrés par la chaleur sur un câble de cuivre prélevé sur un site d'incendie (30X), Experts-Conseils CEP (2002)



(a) (b)

Figure 5.4 : Surface du conducteur de cuivre (a) fusionnée suite à la chaleur avec influence de la gravité et (b) présence d'oxydes de cuivre sur (a)

En addition aux morphologies des dommages précités dans cette section, il est courant de retrouver des dommages purement thermiques ayant même sectionné les extrémités des conducteurs (figures 5.5 et 5.6). En fait, ces régions endommagées laissent fréquemment des extrémités pointues, ce qui est dû à la fusion de la masse de cuivre localisée à l'interface avec l'environnement, et au fait que le centre ne fusionne pas complètement. Ces dommages s'étendent en surface et ne sont pas ponctuels. Des aspérités présentant des arêtes vives s'observent également à ces extrémités.

Figure 5.5 : Dommages thermiques ayant sectionné des conducteurs de cuivre, créés en laboratoire (30X), Experts-Conseils CEP (2004)

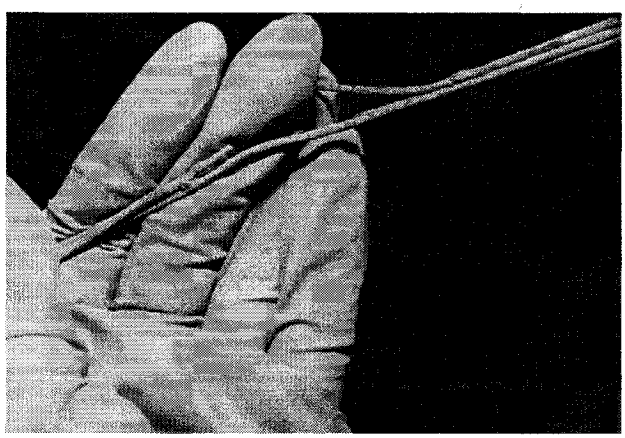


Figure 5.6 : Fusion thermique des conducteurs d'un câble de cuivre récupéré sur une scène d'incendie

En plus de la présence d'oxydes en surface, il est intéressant de noter que les endommagements thermiques ont une morphologie fortement influencée par la gravité. Par conséquent, tout dépendant de l'orientation du conducteur lors de son exposition à une chaleur élevée à un point tel qu'il fusionnera en partie ou complètement, la zone endommagée donnera lieu à une agglomération de métal resolidifié se dirigeant vers le bas (figure 5.7).

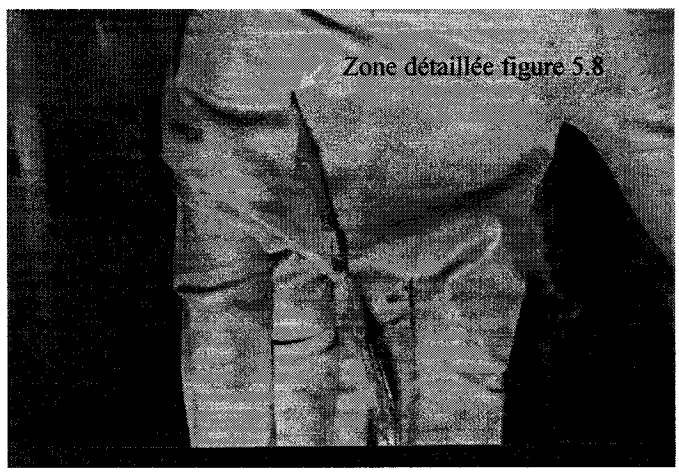


Figure 5.7 : Extrémité sectionnée d'un câble de cuivre récupéré sur une scène d'incendie

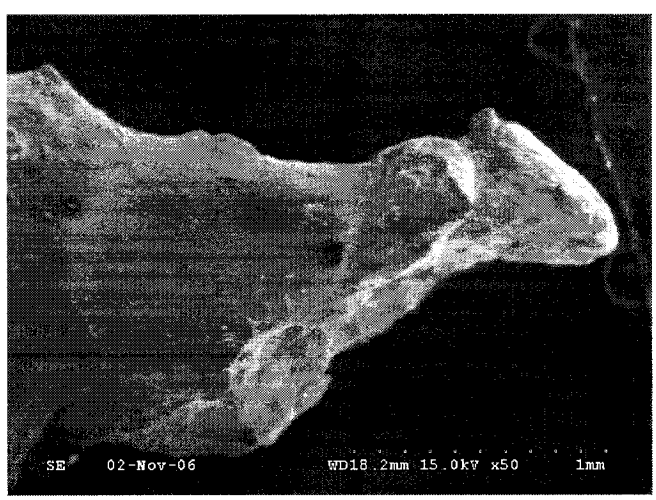


Figure 5.8 : Extrémité d'un conducteur de cuivre fusionné thermiquement, dont la fusion a été influencée par la gravité

Il est de mise de noter qu'en plus de l'impact de la gravité, la tension de surface du cuivre liquide sur celui solide influence également la morphologie des endommagements purement thermiques. C'est la raison pour laquelle il est fréquemment observé que des conducteurs qui n'étaient pas sous tension lors d'un incendie puissent présenter des globules attribuables à de la fusion engendrée par les hausses de températures du milieu.

Dans certains cas, il peut être possible de distinguer, à la surface des zones endommagées par la chaleur, des structures de solidifications présentant une morphologie dendritique. Ces dernières sont relatives à la fusion et à la solidification subséquente de la couche supérieure de cuivre du conducteur en présence d'oxygène dans le milieu. Elles sont révélées grâce à l'environnement très acide des incendies, lequel est créé en partie par la carbonisation des divers matériaux combustibles en présence et même par la pyrolyse de la gaine des câbles faite en PVC (polychlorure de vinhyle).

De fait, cet environnement engendre différents aspects en surface des conducteurs de cuivre comme des vides, des porosités et le dépôt de particules, lesquels agissent comme sites préférentiels pour la germination et la croissance des oxydes de cuivre (figures 5.9 et 5.10). Il serait utopique de croire que le milieu d'un incendie ne comporte que des gaz, donnant alors lieu à des réactions pures d'interaction entre le cuivre solide et l'oxygène. Les gaz de pyrolyse contiennent des matières en suspension dues à la dégradation des solides sous forme notamment de charbon en fines particules, lesquelles peuvent être entraînées par la convection et remplir le milieu pour se déposer sur les différents objets s'y trouvant. Ce dépôt de particules solides en surface des conducteurs de cuivre dont la surface devient liquide permet l'ancrage de ce dernières, d'où leur action subséquente sur la germination et la croissance des oxydes.

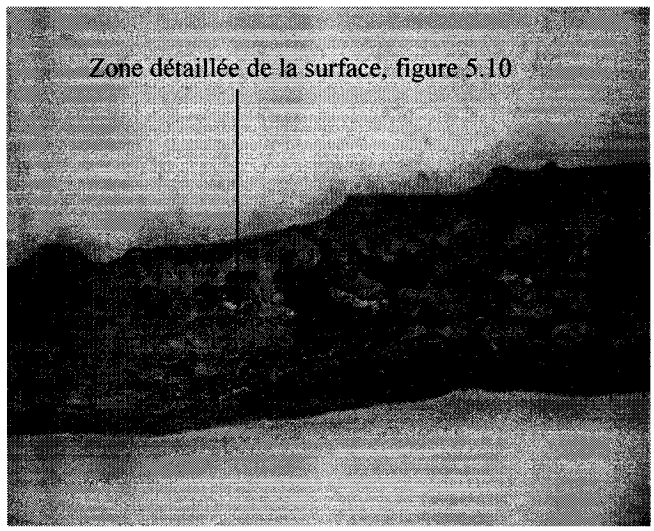


Figure 5.9 : Endommagement par fusion sur un conducteur de cuivre et présence d'oxydes, Experts-Conseils CEP (2004)

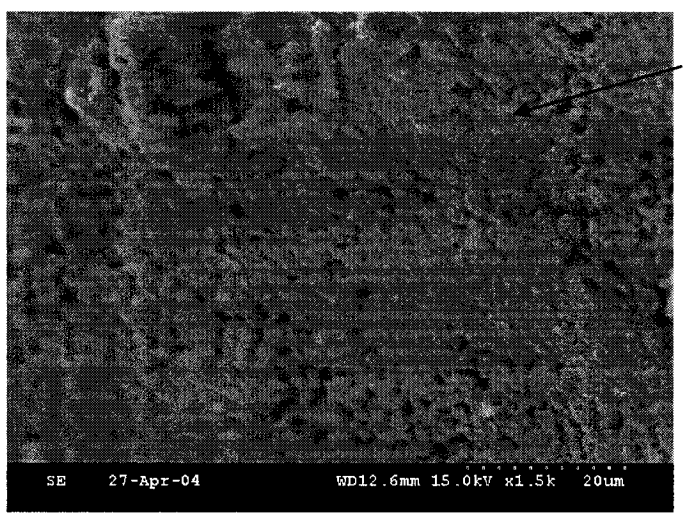


Figure 5.10 : Structure dendritique des oxydes en surface d'un conducteur de cuivre

Cependant, dans de rares cas où l'agressivité du milieu est propice à attaquer les liquide interdendritique engendré par la fusion complète de la surface d'un conducteur de cuivre, la présence de dendrites entières des oxydes en surface du métal peut également être notée. Cette situation survient lorsque les différents éléments dans le

milieu attaquent littéralement la masse de cuivre qui a fondu et s'est resolidifiée, mais en ne ciblant que le liquide interdendritique. Il en résulte une structure dendritique bien définie en surface du métal (figure 5.11).

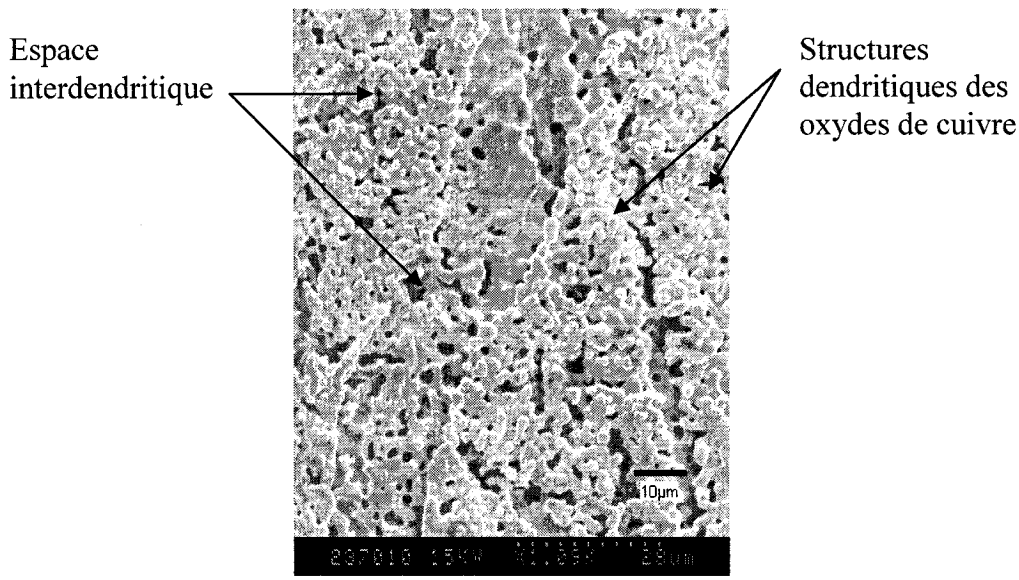
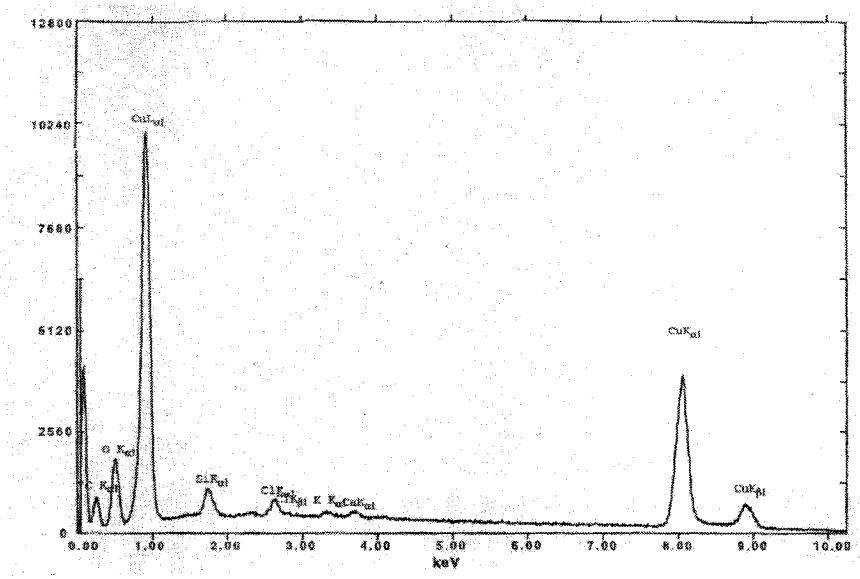


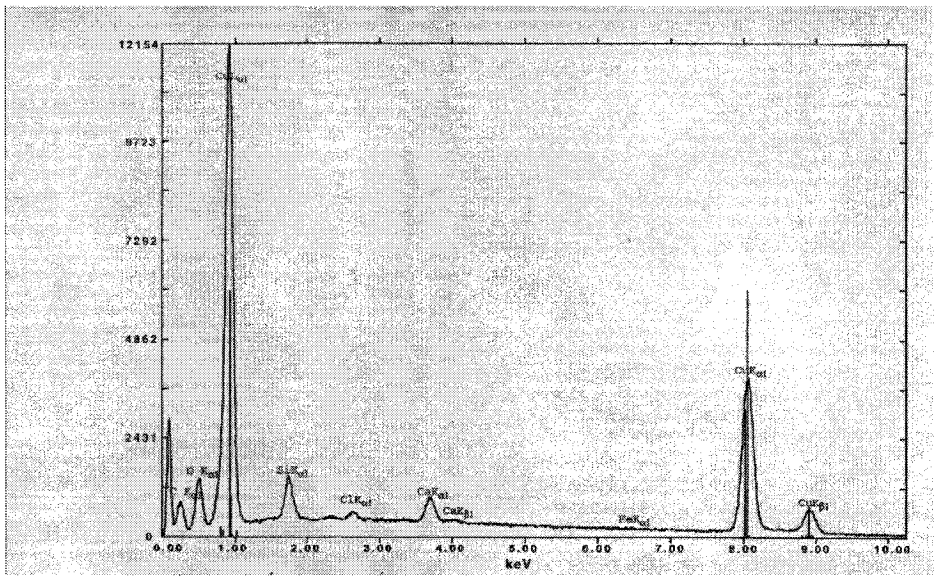
Figure 5.11 : Structure dendritique des oxydes en surface d'un conducteur de cuivre soumis à un milieu d'incendie, ayant fusionné par la chaleur et solidifié par la suite

5.1.1.2 Analyses de composition de surface des endommagements par EDS et microstructures des sections

Seules des analyses de surface sur les divers conducteurs de cuivre endommagés thermiquement permettent de révéler et de noter par le fait même les éléments qui s'y retrouvent. Ainsi, le graphique 5.1 montre les différents éléments présents en surface d'un conducteur de cuivre endommagé en laboratoire alors que le graphique 5.2 révèle ceux localisés en surface d'un conducteur prélevé sur une scène d'incendie.



Graphique 5.1 : Analyses des éléments en surface d'un conducteur de cuivre endommagé par la chaleur par Experts-Conseils CEP (2003)



Graphique 5.2 : Analyse des éléments en surface d'un conducteur de cuivre endommagé par la chaleur suite à un incendie

Ainsi, les éléments en présence sur les conducteurs étaient sensiblement les mêmes. À l'exception du cuivre, du carbone et de l'oxygène, les autres éléments identifiés comme le silicium et le chlore étaient des contaminants provenant de la pyrolyse et de la carbonisation des gaines isolantes entourant les conducteurs, de même que du milieu et de l'eau de l'arrosage. Il faut se rappeler que ces conducteurs ont été soumis à de très hautes températures dépassant les 1000 °C de sorte que plusieurs éléments se sont dégradés dans le milieu, laissant alors leur trace sur les brins de cuivre.

Les figures 5.12 et 5.13 illustrent les microstructures des conducteurs de cuivre affectées thermiquement, respectivement en laboratoire et suite à un incendie. Dans les deux cas, les grains ont crû au centre et sont de tailles quasi similaires et équiaxes. Il existe également, à l'interface entre les grains de cuivre et le matériau de l'enrobage, une région plus pâle générée par la croissance d'oxydes en surface du conducteur.

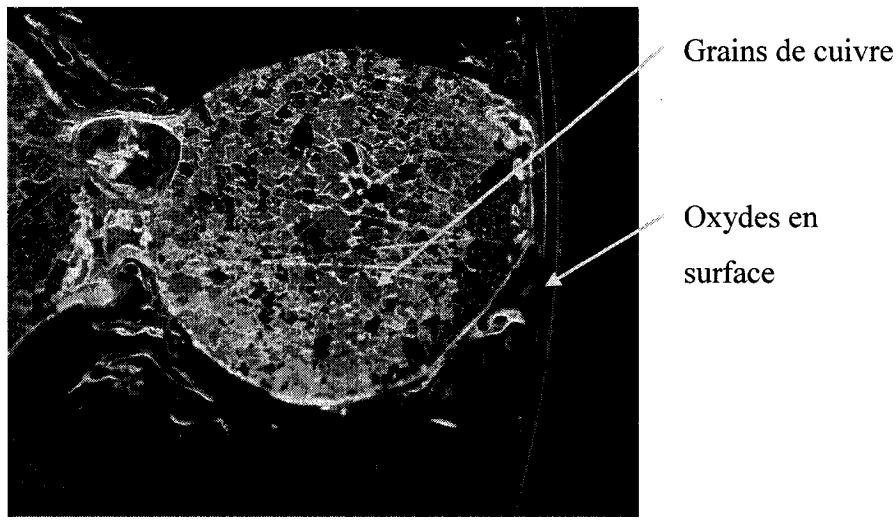


Figure 5.12 : Microstructure d'un conducteur de cuivre affecté thermiquement, Experts-Conseils CEP (2005)

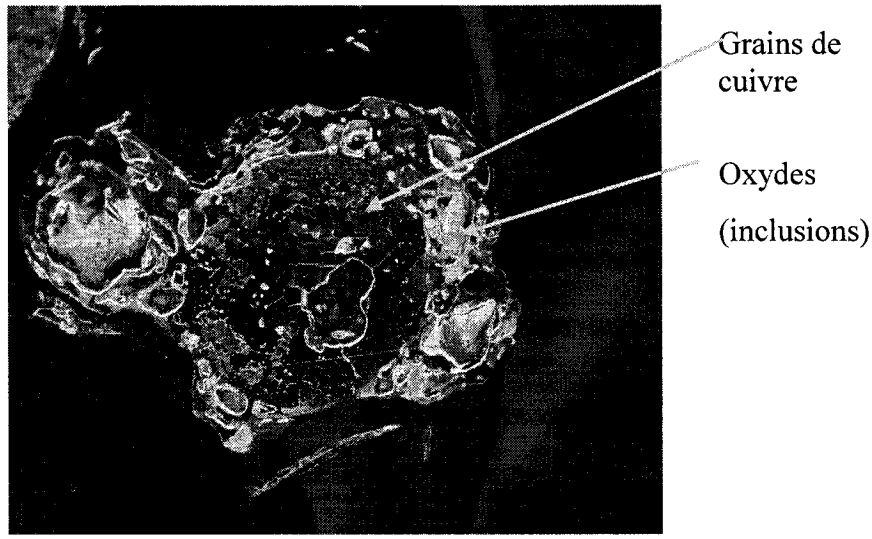


Figure 5.13 : Microstructure d'un conducteur de cuivre prélevé sur une scène d'incendie

Il est intéressant de noter que les grains localisés au pourtour, dans les deux cas, sont de taille plus fine que ceux localisés au centre. Ceci est dû, en toute probabilité, au fait que la surface extérieure des conducteurs s'est liquéfiée, compte tenu de la chaleur ambiante, et elle s'est resolidifiée par la suite, suivant le refroidissement du conducteur. Dans ces circonstances, les grains du pourtour ont subi une recristallisation complète en plus de devenir sous phase liquide, d'où leur taille plus fine que ceux de l'intérieur qui n'ont que grossi, sans subir de recristallisation ni de fusion. De plus, l'extraction de chaleur de la surface extérieure était plus favorable et de moindre énergie aux grains localisés au centre du conducteur.

En plus de ces diverses caractéristiques, il peut même arriver que la structure de solidification soit différente, suite à la fusion et à la resolidification du cuivre. En effet, des dendrites peuvent être identifiables, comme montré à la figure 5.14 suivante. Ces dendrites résultent de la fusion du pourtour du conducteur de cuivre, d'où leur localisation dans la région du périmètre de celui-ci. De plus, elles ne sont pas présentes sur toute la circonférence du conducteur puisque la surface extérieure du conducteur n'a pas été soumise également à la chaleur. En effet, tout dépendant de la localisation des

flammes et de leur position relative par rapport aux conducteurs de cuivre, l'effet de la température sur la surface peut donner lieu à des conditions différentes pour un même conducteur.

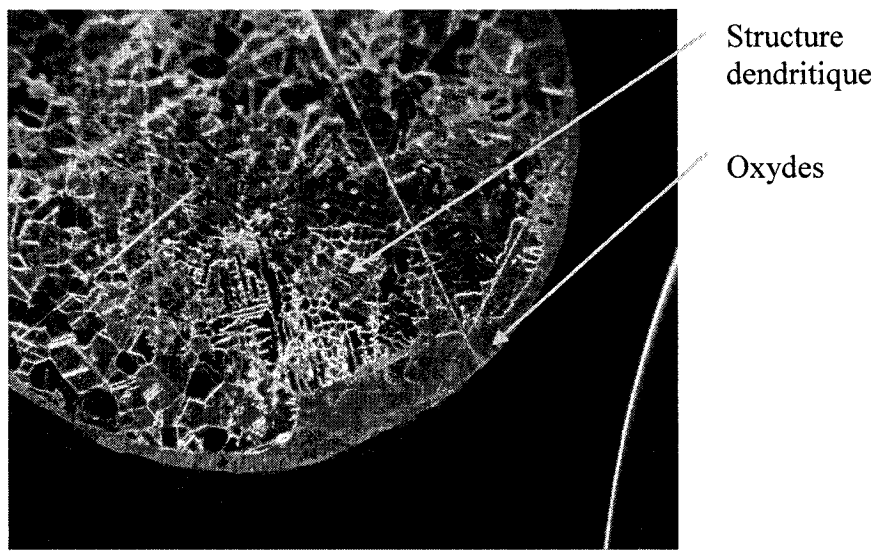


Figure 5.14 : Structure dendritique, conducteur de cuivre affecté par la chaleur et prélevé sur un site d'incendie (2003)

Quant à la microstructure transversale du conducteur de cuivre, celle-ci ne porte plus aucun signe de la mise en forme lorsque exposée à des températures ayant permis la fusion de son pourtour (figure 5.15). En fait, les grains centraux se sont modifiés, influencés par la chaleur ambiante. Par conséquent, ils ont grossi et même recristallisés pour devenir équiaxes. De plus, la surface extérieure est recouverte d'oxydes et de vides (porosités) révélés par cette métallographie. Ces résultats corroborent donc ceux obtenus suite aux observations macroscopiques et microscopiques de la surface des conducteurs de cuivre.

Figure 5.16

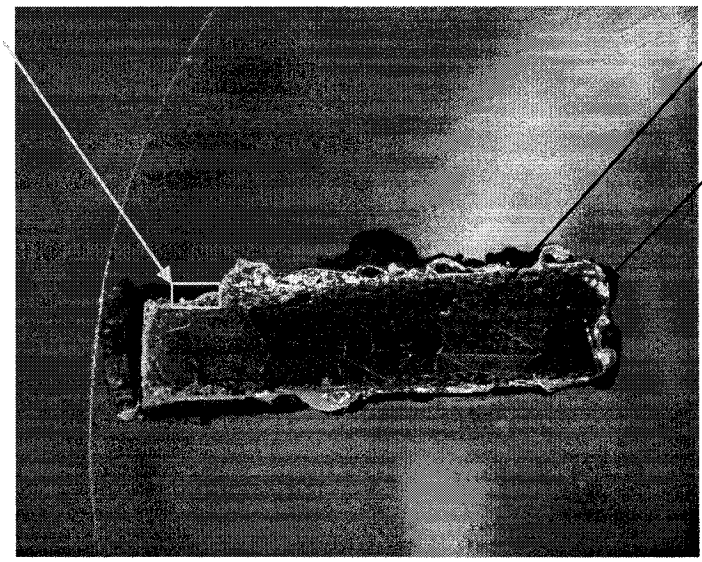


Figure 5.15 : Microstructure transversale d'un conducteur de cuivre soumis à la chaleur et prélevé sur un incendie (2004)

L'influence de la température sur la morphologie des conducteurs de cuivre peut avoir différents effets dont notamment la fusion partielle ou complète, laissant ainsi des extrémités amincies et pointues ainsi que des masses resolidifiées de cuivre influencées par la gravité. La coloration du conducteur de cuivre peut également être influencée par la chaleur. Cette coloration en surface découle de la croissance des oxydes ainsi que de la déposition des particules ambiantes en surface, alors que le conducteur de cuivre atteint des températures environnant son point de fusion.

En ce qui concerne la microstructure, celle-ci est également affectée par la chaleur d'un incendie, générée en laboratoire ou réelle. En fait, la chaleur fait croître les grains et efface l'effet laissé par la mise en forme sur la morphologie de ceux-ci. Lorsque la température atteint celle de fusion du cuivre (1083°C), il y a transition de la phase solide à liquide et resolidification par la suite qui peut révéler la présence de structures dendritiques par la formation d'oxydes de cuivre.

L'évolution du profil des oxydes en surface des conducteurs de cuivre a été caractérisée par une analyse linéaire de la variation des deux éléments que sont l'oxygène et le cuivre (figure 5.16 et graphique 5.3).

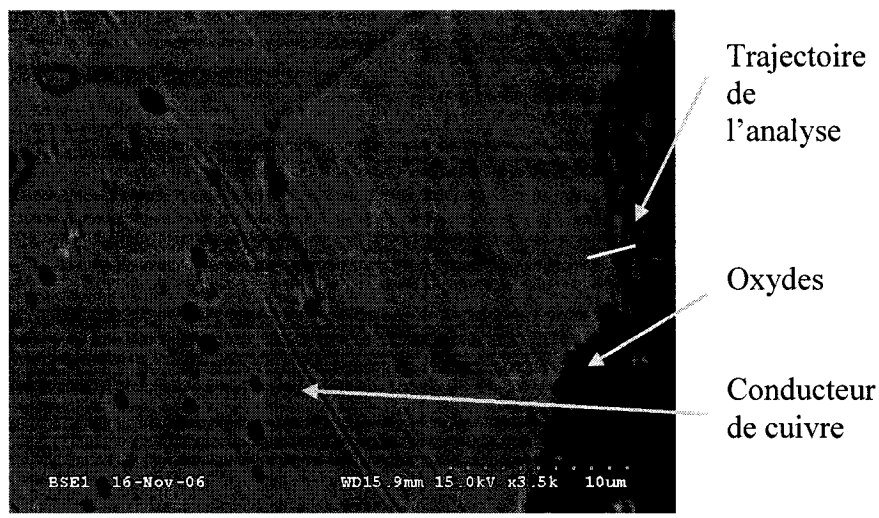
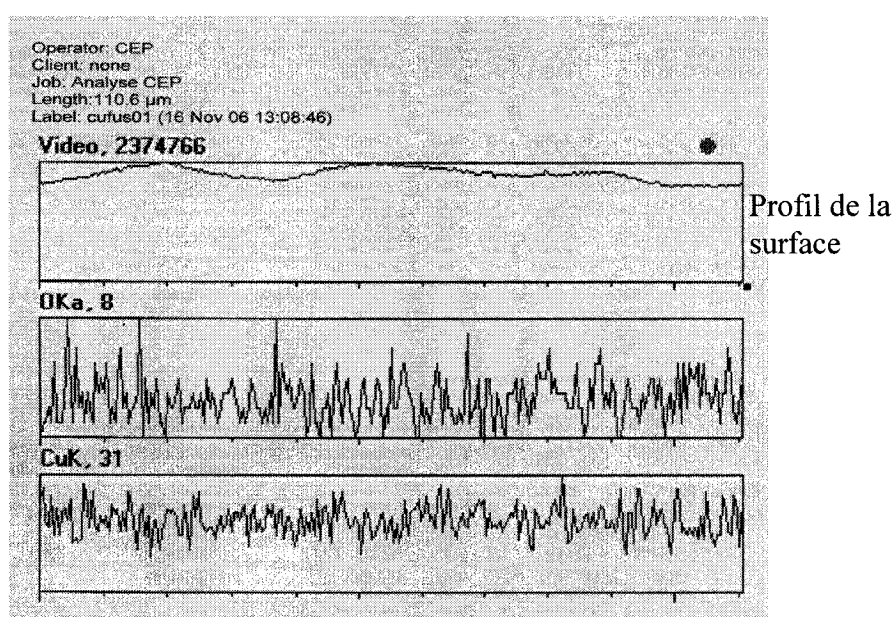


Figure 5.16 : Vue à fort grossissement de la surface du conducteur de cuivre fusionné par la chaleur et indication de la trajectoire de l'analyse (graphique 5.3)



Graphique 5.3 : Analyse de l'oxygène et du cuivre dans la trajectoire (figure 5.16)

Les résultats de cette analyse le long de la trajectoire révèle qu'il y a une forte interaction entre le cuivre et l'oxygène dans la région du pourtour du conducteur de cuivre soumis à la fusion thermique. Cependant, la variation moyenne de la proportion d'oxygène par rapport au cuivre est presque constante et ne permet pas de déterminer, d'une part, la localisation précise des deux types d'oxydes de cuivre et d'autre part, une tendance entre la réaction des éléments et la formation des oxydes. Cependant, il ressort que l'oxygène a réagi avec le cuivre, d'où sa présence en ces proportions.

5.1.2 Fusion du cuivre multibrins

La fusion purement thermique des conducteurs de cuivre multibrins implique des phénomènes similaires à ceux qui se produisent lors de la fusion des câbles à conducteurs solides (pleins). Cependant, compte tenu de la masse thermique plus faible de ces brins de diamètre inférieur à celui des conducteurs, cette fusion exige moins d'énergie et c'est la raison pour laquelle il est fréquent de retrouver ce type de composant fusionné suite à un incendie. Dans les faits, il est possible de fusionner un brin de cuivre provenant d'un conducteur multibrins à l'aide d'une allumette.

5.1.2.1 Examens macroscopique et microscopique

Peu importe la méthode utilisée pour engendrer des endommagements thermiques sur des conducteurs multibrins, il en ressort que la fusion peut n'affecter que quelques brins aussi bien que la totalité de ceux-ci (figures 5.17 et 5.18). Cependant, les dommages thermiques impliquent rarement qu'un seul brin du conducteur multibrins, ce qui s'explique par le fait que la température locale, suffisante pour affecter un brin, le sera pour affecter les brins voisins . Toutefois, il est fréquent qu'un seul des conducteurs multibrins soit endommagé par la chaleur, tout dépendant de son orientation par rapport aux flammes. Ceci réside dans le fait que chacun des

conducteurs multibrins est localisé dans une gaine plastique, laquelle est également enveloppée dans une gaine supplémentaire.

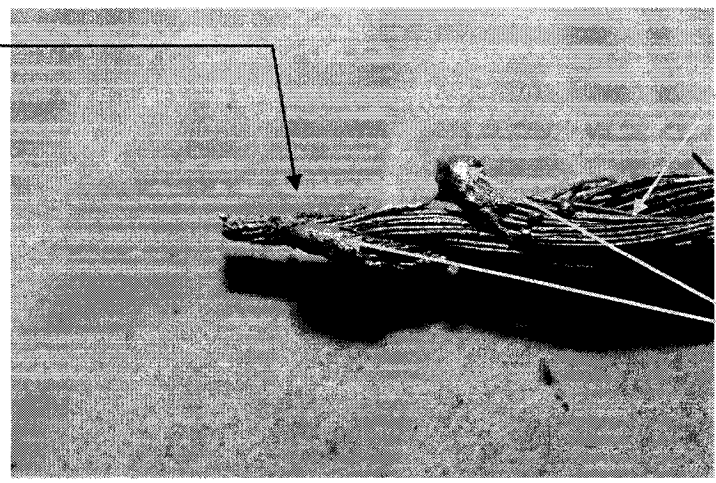


Figure 5.17 : Endommagement thermique fait en laboratoire d'un cordon impliquant plusieurs conducteurs multibrins de cuivre, Experts-Conseils CEP (2005)

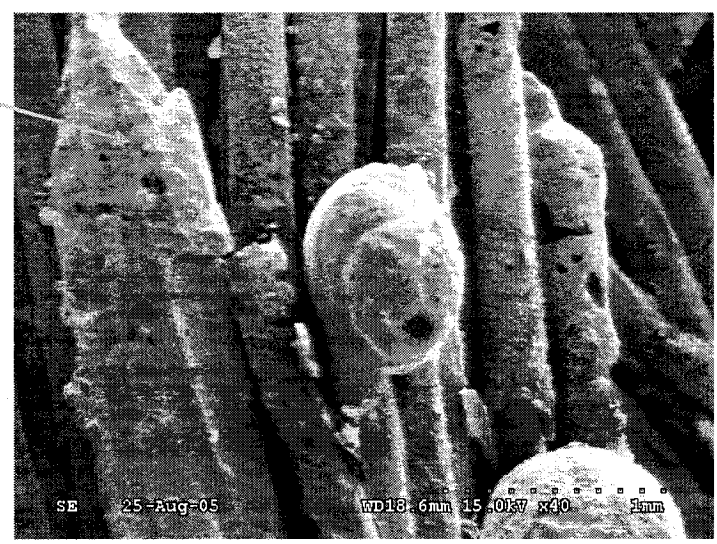


Figure 5.18 : Agglomération de brins de cuivre d'un conducteur multibrins liée à des dommages thermiques faits en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2005)

Il ressort alors, suite aux observations à fort grossissement, que les brins de cuivre du conducteur perdent de leur intégrité et s'agglomèrent pour former une masse qui se resolidifie sans laisser d'indications du nombre de brins impliqués au point de rupture. Cette région particulière au point de rupture s'étend habituellement sur une longueur appréciable et implique plusieurs brins (figures 5.19 et 5.20).

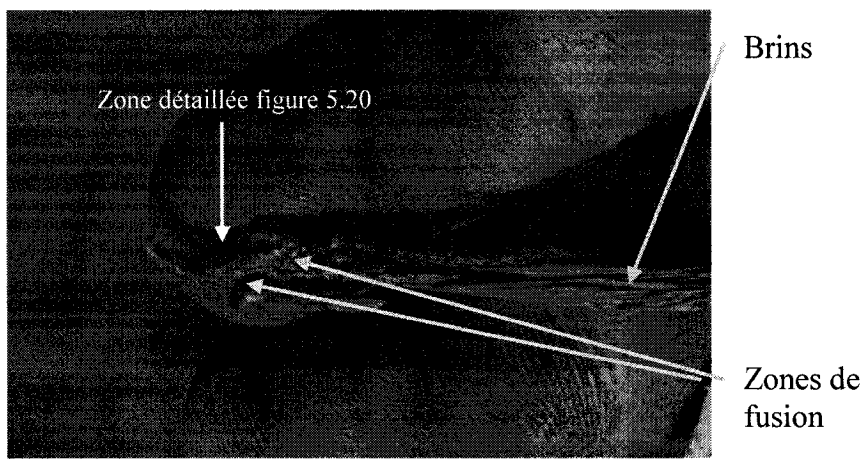


Figure 5.19 : Endommagement thermique de conducteurs multibrins de cuivre prélevés sur une scène d'incendie (2002)

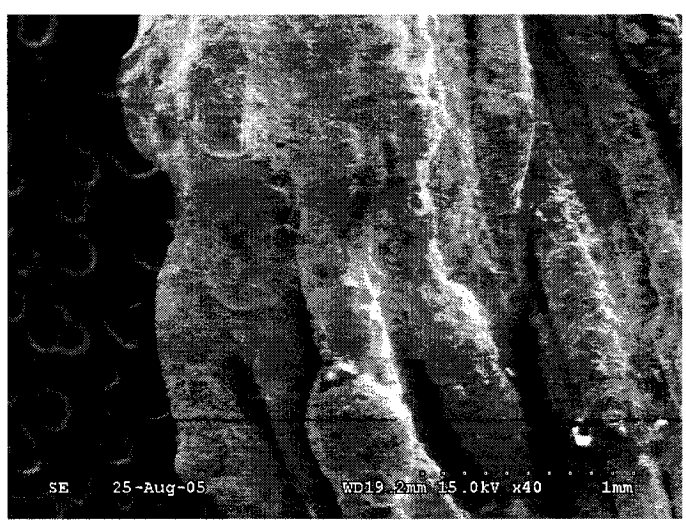


Figure 5.20 : Masse agglomérée de divers brins de cuivre provenant de deux conducteurs multibrins fusionnés par la chaleur d'un incendie

En plus des régions endommagées par la chaleur qui peuvent s'étendre et affecter une longueur appréciable des conducteurs multibrins, la zone portant les dommages peut également être relativement ponctuelle (figures 5.21 et 5.22). Quant au nombre de conducteurs multibrins impliqués, il demeure une donnée aléatoire.

Figure 5.21 : Dommage ponctuel par fusion thermique sur un seul conducteur multibrins de cuivre endommagé thermiquement en laboratoire (2004)

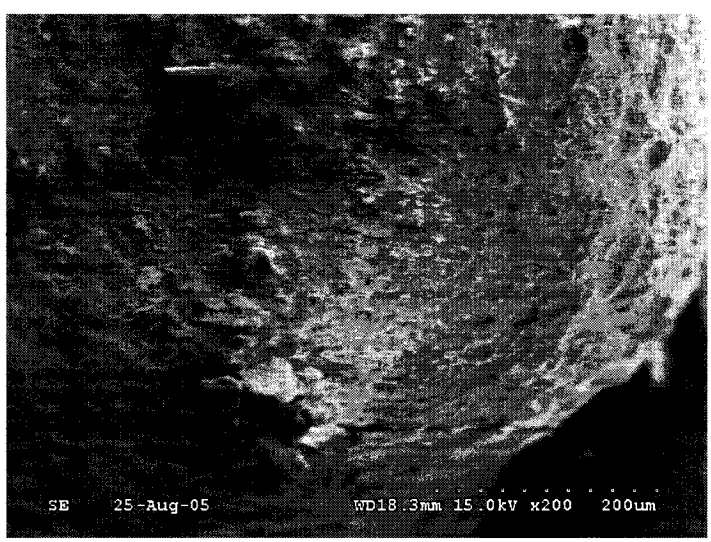


Figure 5.22 : Surface de la zone endommagée par fusion sur un conducteur multibrins de cuivre où les brins demeurent non identifiables

Les détails en surface des zones endommagées thermiquement révèlent un fini de surface rugueux et poreux ainsi que la présence d'oxydes de cuivre s'étant développés conséquemment aux hautes températures du milieu environnant les conducteurs (figures 5.23 et 5.24). Ces oxydes ainsi que des particules provenant de la dégradation des matériaux carbonisés dans le milieu couvrent les régions endommagées thermiquement.

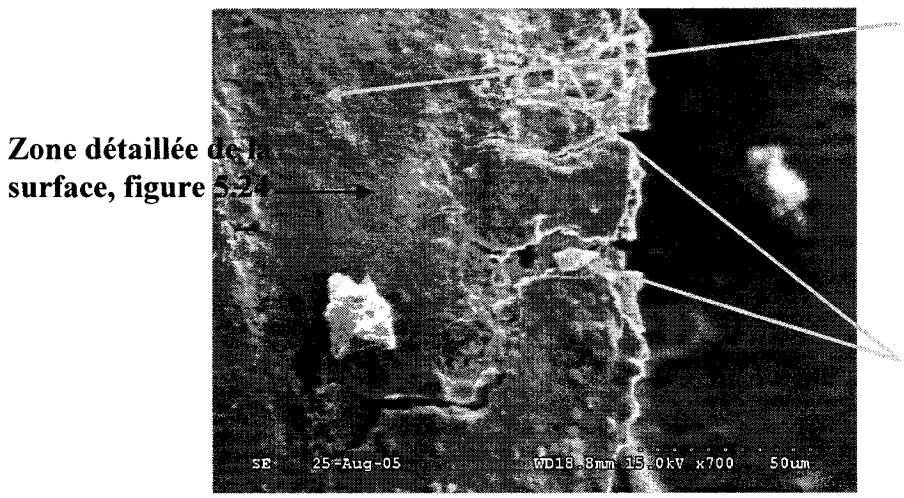


Figure 5.23 : Dommages thermiques et oxydes en surface d'un conducteur de cuivre multibrins endommagé en laboratoire, Experts-Conseils CEP inc. (2005)

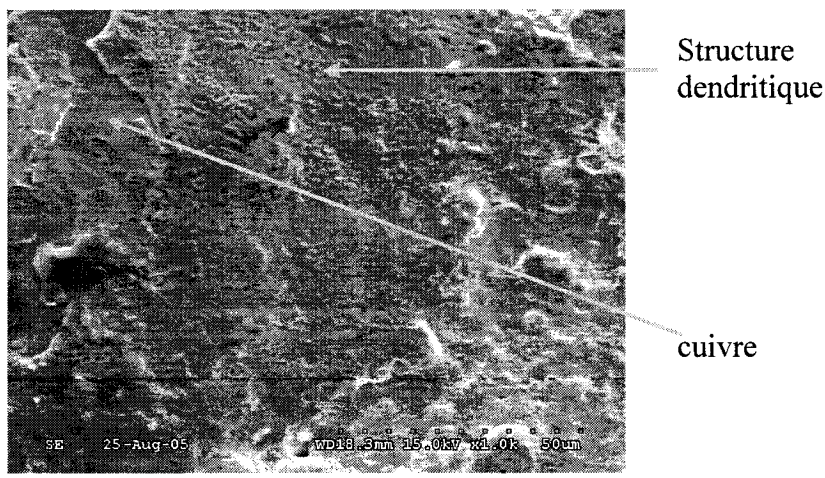


Figure 5.24 : Structures dendritiques d'oxydes en surface de la zone endommagée thermiquement sur un conducteur multibrins de cuivre

Il est intéressant de noter à la photographie 5.24 précédente que, tout comme c'était le cas pour les conducteurs de cuivre solides, des structures dendritiques de resolidification peuvent également s'observer en surface des conducteurs multibrins. La formation de ces structures dendritiques découle du fait que la fusion des brins de cuivre engendre la formation d'une masse continue de cuivre, laquelle se solidifie dans un milieu oxydant en présence de gaz divers. Comme la présence de l'oxygène est indéniable ainsi que différentes particules découlant de la pyrolyse des matériaux environnants et présents dans le milieu, il y a dépôt de particules en surface de la masse de cuivre liquide. Ces particules agissent comme sites de germination et de croissance des oxydes en surface du cuivre.

En résumé, les différentes caractéristiques morphologiques de la fusion thermique d'un conducteur de cuivre multibrins sont similaires à celles énumérées dans le cas de la fusion thermique des conducteurs de cuivre solides. De fait, autant les différents aspects démontrés par l'examen macroscopique que microscopique révèlent des caractéristiques observables et distinguables dans les deux cas.

Par conséquent, la fusion thermique entraîne la création de masses fusionnées oblitérant en agglomérant les brins, lesquelles sont influencées par la position du conducteur et par la gravité. La chaleur du milieu peut n'endommager qu'un des trois conducteurs, tout dépendant de son orientation par rapport aux flammes. Les dommages ainsi créés peuvent s'étendre sur les brins et atteindre des longueurs de quelques millimètres, et même de quelques centimètres. Quant à la surface, elle est fortement oxydée et porte des sillons, des craquelures et beaucoup de porosités.

À plus fort grossissement, plusieurs caractéristiques morphologiques ressortent. En effet, il est possible d'identifier les brins à l'extérieur de la zone endommagée, mais cette distinction n'est plus possible dans la région affectée par la chaleur puisque tous les brins ont fondu, formant ainsi une masse importante. Précisons que cette masse

n'est pas déposée sur les brins mais les englobe et constitue plutôt le prolongement de ceux-ci.

5.1.2.2 Analyses de composition de surface des endommagements par EDS et microstructures des sections

Le globule de la zone obtenue par fusion thermique des divers brins du conducteur multibrins de la figure 5.17 a été coupé et poli afin de révéler sa microstructure et la présence d'oxydes en surface. Cette opération a révélé de nombreuses porosités très fines au centre de la masse constituée de brins fondus et solidifiés ainsi que des porosités de plus grande taille localisées près de la surface extérieure, soit en périphérie (figure 5.25). Il est de mise de noter qu'il ne subsiste aucun brin différenciable dans la masse solidifiée, indiquant alors que ceux-ci se sont amalgamés pour ne faire qu'une masse poreuse.

Figure 5.26

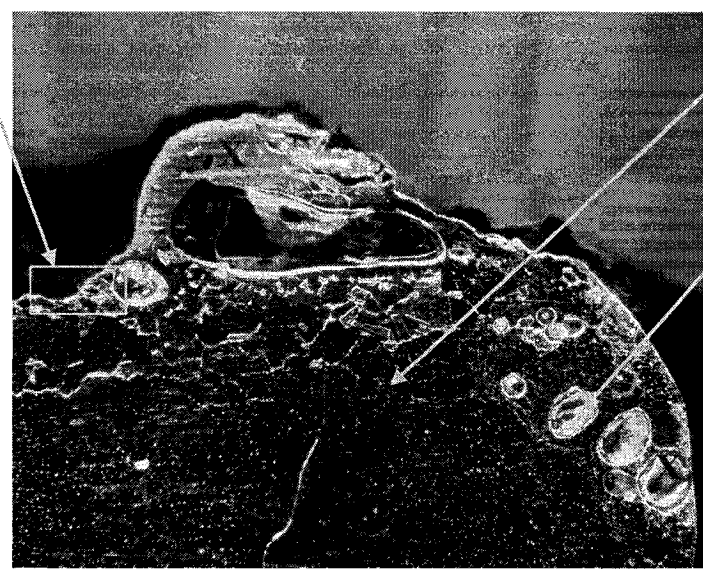


Figure 5.25 : Microstructure de la zone fusionnée et solidifiée suite à un endommagement thermique d'un conducteur de cuivre multibrins

Des analyses de variations des profils de composition d'oxygène et de cuivre ont également été réalisés dans la zone indiquée à la figure 5.26. Ces analyses avaient pour but de déterminer l'évolution des oxydes de cuivre dans la masse fondue et solidifiée (graphique 5.4).

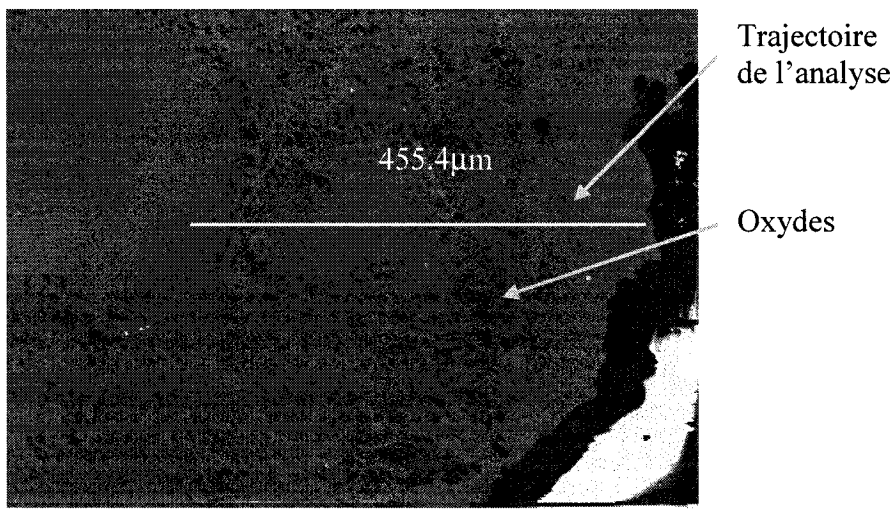
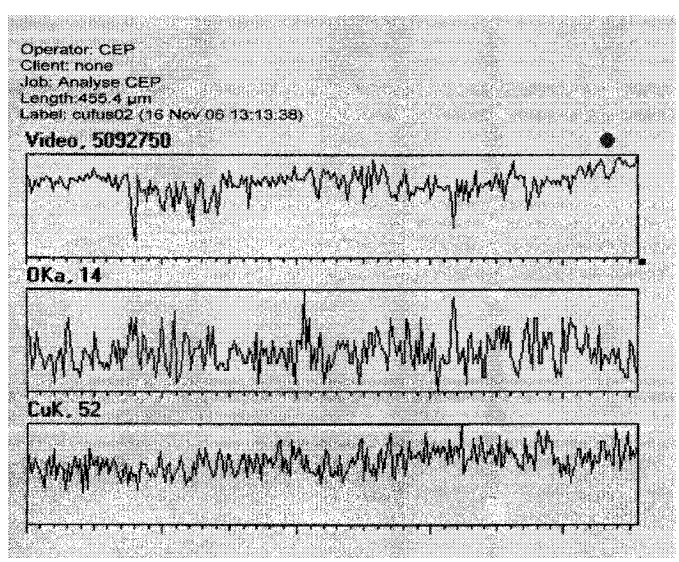


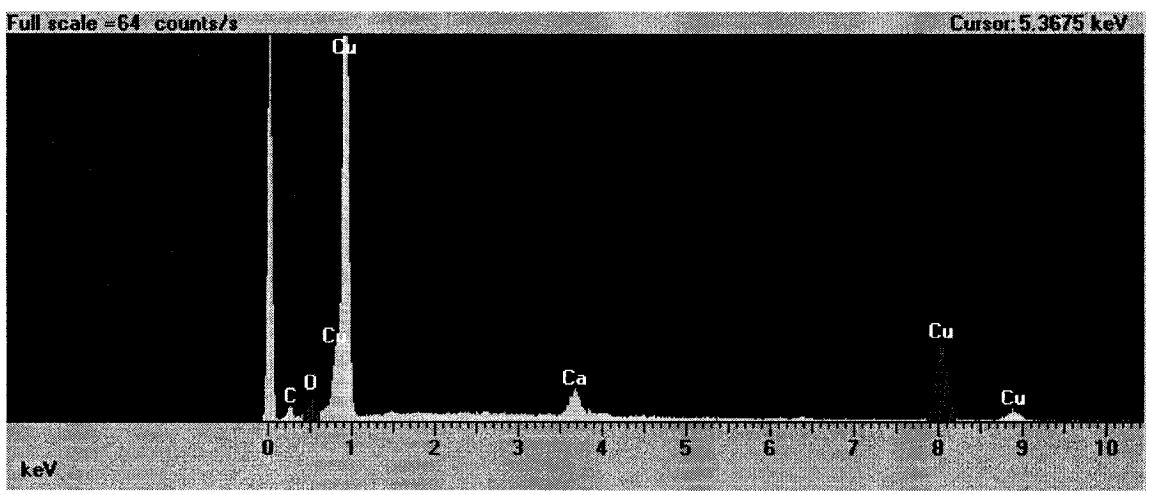
Figure 5.26 : Globule de cuivre fait par fusion thermique et provenant d'un conducteur multibrins vu au microscope électronique à balayage (1.8K), en électrons rétrodiffusés



Graphique 5.4 : Analyse de l'oxygène et du cuivre dans la zone de 455.4µm

Il ressort de la figure 5.26 et du graphique 5.4 que la distribution et la variation du cuivre et de l'oxygène dans la masse fondue ne suit aucune tendance particulière. En fait, ces profils linéaires démontrent la présence des deux éléments que sont le cuivre et l'oxygène dans toute l'épaisseur de la masse fondue et solidifiée subséquemment, sans toutefois laisser transparaître de tendance particulière, comme c'était le cas pour le cuivre solide.

Quant aux éléments en présence dans cette masse, il se résument en du cuivre, de l'oxygène, du carbone et du calcium (graphique 5.5), dont la présence s'explique par le fait que le conducteur multibrins provient d'un milieu d'incendie.



Graphique 5.5 : Analyse en surface du conducteur de cuivre multibrins

5.1.3 Fusion de l'aluminium

Comme la fusion de l'aluminium survient à des températures relativement basses, de l'ordre de 660°C, il est fréquent d'identifier des composants d'aluminium fondus suite à un incendie, surtout lorsque ceux-ci étaient localisés à proximité du foyer d'incendie ou exposés directement aux flammes. De plus, il est également possible que

certaines sections des conducteurs de cuivre ne soient pas retrouvées puisqu'elles ont simplement fondu et ce sont détachées du reste des conducteurs. Ajoutons aux câbles dont les conducteurs sont faits d'aluminium ceux dont les conducteurs sont en cuivre, mais protégés par une gaine constituée d'aluminium. L'analyse des composants de cuivre demeure précaire puisque certains câbles d'aluminium, même localisés à l'extérieur du foyer d'incendie, peuvent fondre si les températures locales sont supérieures à celle de fusion de ce composant.

5.1.3.1 Examens macroscopiques et microscopiques

L'aluminium, comme les autres métaux susceptibles de fondre pendant un incendie, verra tout d'abord sa surface extérieure monter en température jusqu'à ce qu'elle fusionne, enlevant alors les marques laissées par la mise en forme. Cependant, puisque les températures au sein d'un incendie sont supérieures à celle de fusion de ce métal, l'aluminium retrouvé portera des endommagements thermiques importants ayant affecté tout le diamètre des conducteurs (figure 5.27).

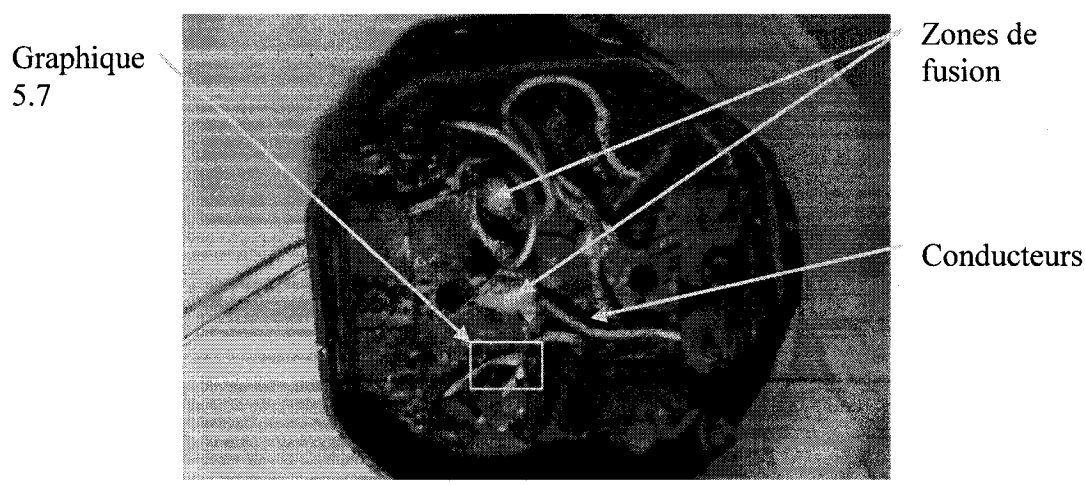


Figure 5.27 : Fusion des conducteurs d'aluminium dans une boite de jonction prélevée sur une scène d'incendie

Les conducteurs d'aluminium, en fondant, présentent des caractéristiques morphologiques similaires à celles énumérées pour le cuivre, à moins qu'ils ne fusionnent totalement. Les marques laissées par la mise en forme s'estompent et la brillance du fini de surface laisse la place à une couleur matte et grisâtre (figures 5.28 et 5.29).

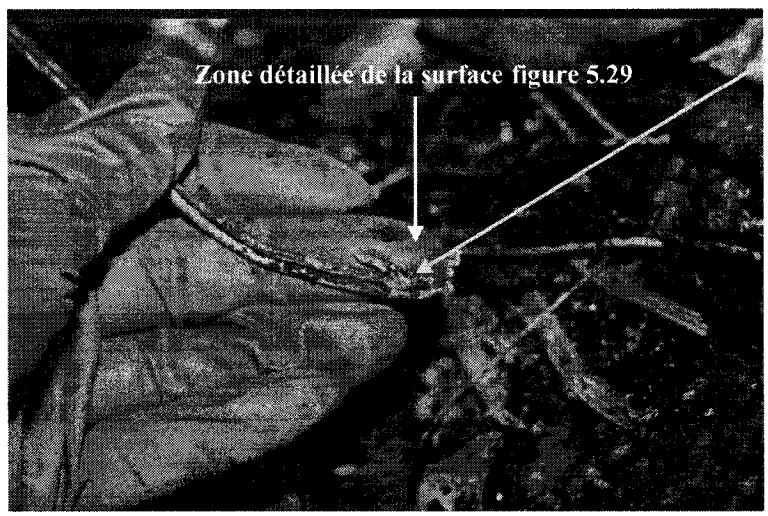


Figure 5.28 : Extrémité fondue par la chaleur, conducteur d'aluminium prélevé sur un site d'incendie en 2005

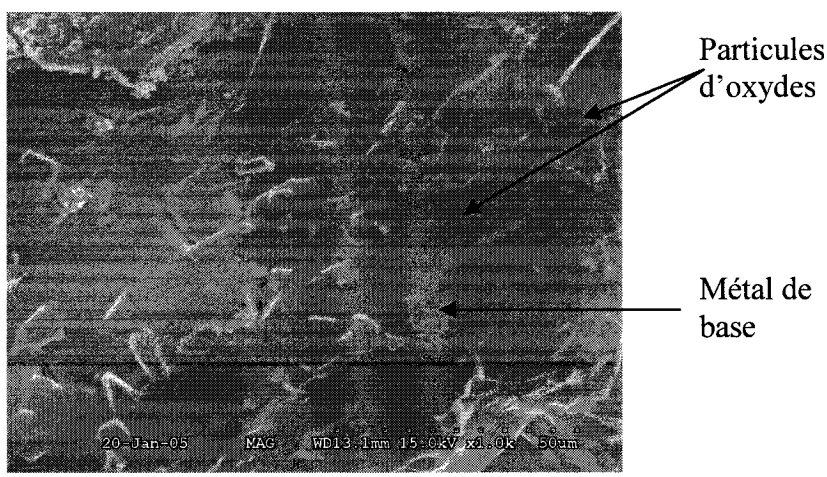
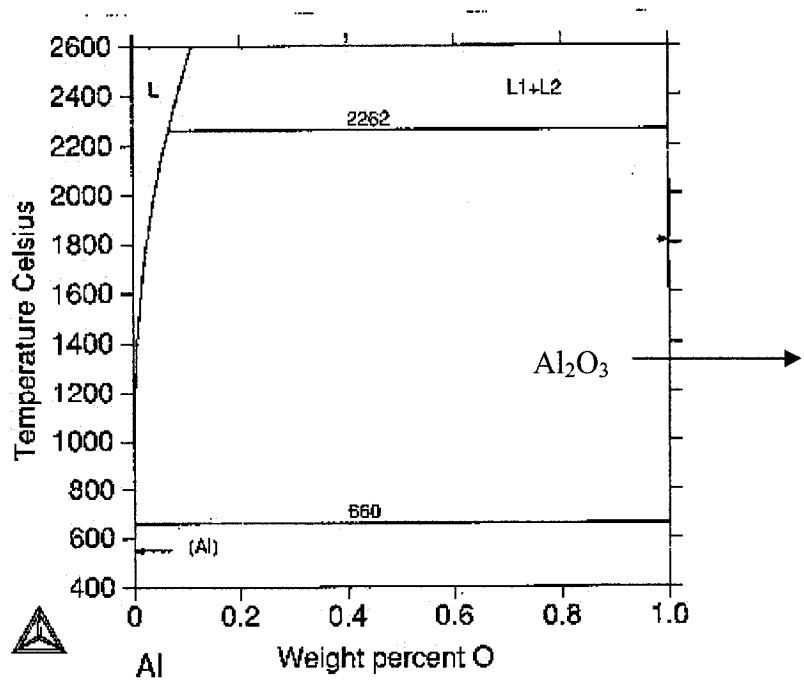


Figure 5.29 : Surface fondue d'un conducteur d'aluminium montrant des particules d'oxydes et des dépôts de résidus d'incendie

Bien que macroscopiquement, les morphologies des dommages par fusion aux conducteurs d'aluminium laissent des signes similaires à ceux énumérés pour les conducteurs de cuivre, les informations tirées des examens microscopiques révèlent cependant plusieurs différences. Alors que les conducteurs d'aluminium présentent des amincissements de leur diamètre jusqu'au sectionnement de celui-ci, des globules formés de l'agglomération de plusieurs conducteurs et même des extrémités étirées et pointues influencées par la gravité, la surface des conducteurs à fort grossissement montre cependant des signes autres.

À cet effet, il est de mise de souligner que l'examen microscopique des conducteurs d'aluminium constitue une étape que nous ne pouvons rarement effectuer puisque les températures d'un incendie créeront la fusion complète des conducteurs. Cependant, lorsque la température d'un incendie affecte l'aluminium de façon plutôt superficielle, soit sans en causer la fusion complète au point où des portions deviendront manquantes, ces observations peuvent être réalisées. Elles révèlent alors des surfaces couvertes de particules d'oxydes d'aluminium et autres provenant de la carbonisation des matériaux environnants le conducteur, lesquelles se sont déposées lors de la fusion de l'aluminium et sont demeurées emprisonnées dans la masse de métal en fusion. Cependant, la formation des oxydes d'aluminium est un phénomène qui est contrôlé par la réaction de l'oxygène avec la matrice d'aluminium (graphique 5.6). Ainsi, l'oxyde croît par diffusion et se développe à basse température (phénomène lent) et à plus haute température où il se forme plus rapidement. D'ailleurs, les oxydes sont tous stochiométriques, peu importe leur température de formation. Quant à la quantité d'oxygène disponible, elle influence également la croissance de l'oxyde puisque la solubilité de l'oxygène dans l'aluminium est restreinte aux températures connues des milieux d'incendie, soit aux environs de 800°C à 1000°C. En fait, la solubilité de l'oxygène dans l'aluminium devient plus importante à très hautes températures, mais celles-ci ne sont pas atteintes lors des incendies.



Graphique 5.6 : Diagramme partiel d'équilibre aluminium-oxygène, tiré de la collection de SGTE (2006)

Il faut également se rappeler, comme il a été exposé au chapitre 2, que les propriétés de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) sont extrêmement différentes de celles du métal, de sorte que la croissance de cet oxyde sur le métal est sujette à de nombreuses modifications suite à la fusion et la solidification de l'aluminium. Alors que le métal est ductile et présente d'excellentes propriétés conductrices, l'oxyde d'aluminium est plutôt isolant et fragile.

À cet effet, il est fréquent d'identifier, à fort grossissement, diverses fissures en surface des régions fusionnées thermiquement des conducteurs d'aluminium (figures 5.30 et 5.31). Ces fissures découlent du fait que la croissance de l'oxyde sur le métal fusionné qui se solidifie à une densité et une ductilité moindre que le métal lui-même. Comme ces oxydes sont bien liés au métal de base qui est sujet aux déformations, la

différence de densité lors de la solidification du métal et de son oxyde engendre des fissures en surface des oxydes, lesquelles se manifestent préférentiellement aux joints de grains et donnent lieu à de nombreuses craquelures en surface du conducteur.

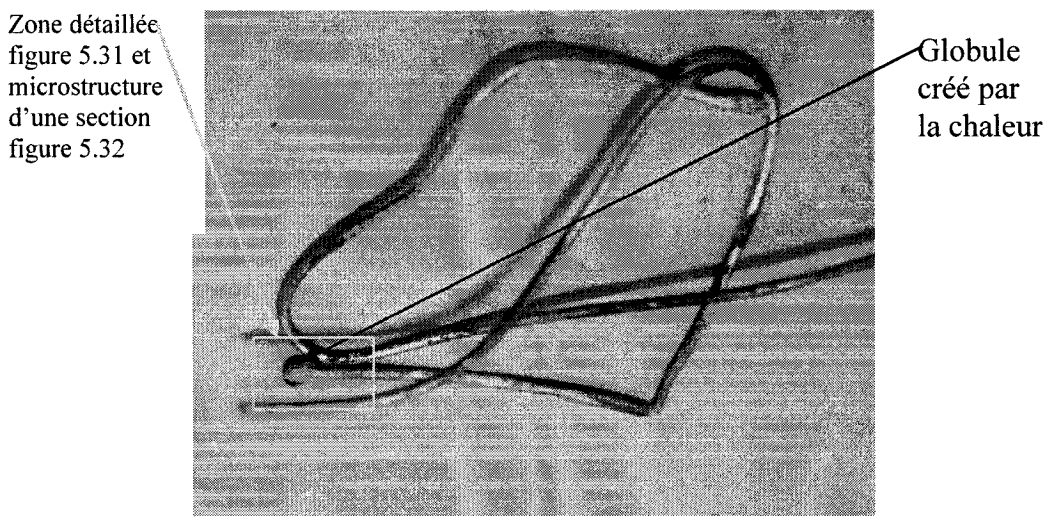


Figure 5.30 : Globule lié à un endommagement thermique créé en laboratoire sur un conducteur d'aluminium (2004)

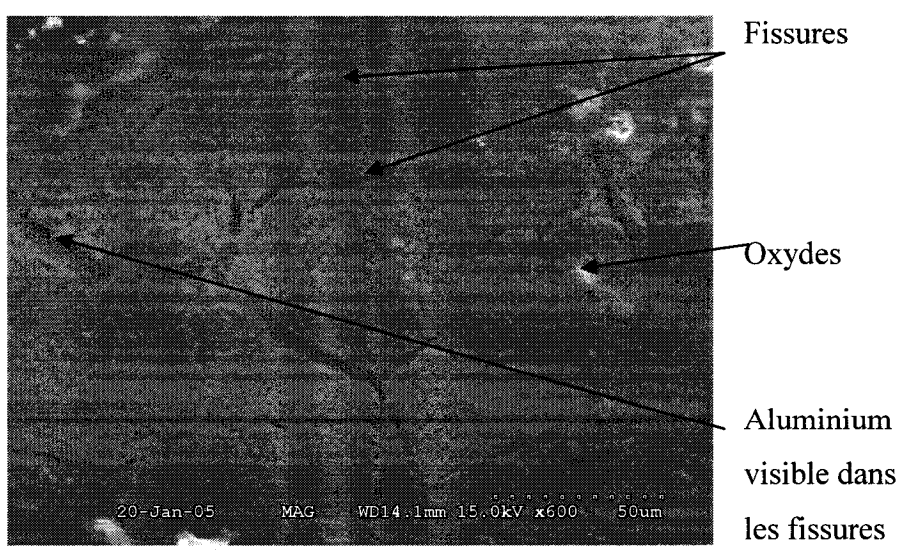
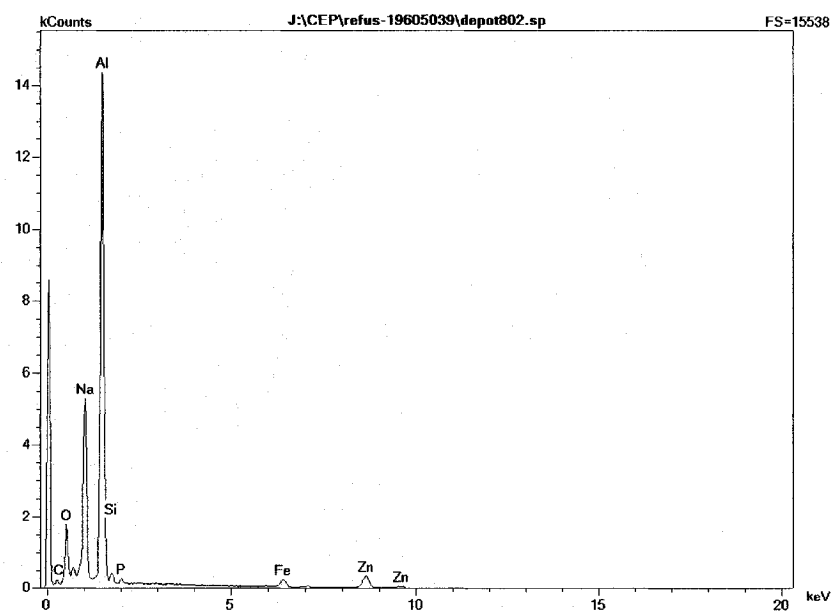


Figure 5.31 : Fissures des oxydes en surface d'un conducteur d'aluminium fusionné thermiquement

Contrairement à la formation des oxydes sur le cuivre, laquelle pouvait conduire à des structures dendritiques par germination et croissance, ces structures ne sont pas engendrées par la formation des oxydes d'aluminium qui est contrôlée par la diffusion. De plus, le fait que la couche d'oxyde Al_2O_3 en surface ait une température de fusion beaucoup plus élevée que le métal rend celle-ci beaucoup moins susceptible à la fusion.

5.1.3.2 Analyse de composition chimique par EDS et microstructures des sections

Des analyses de composition réalisées en surface des conducteurs d'aluminium ont été faites afin de caractériser les différents éléments ayant altérés ces conducteurs suite à un incendie. Ainsi, un des conducteurs de la boîte de jonction de la figure 5.27 a été analysé dans le but précis de relever les éléments en présence (graphique 5.7).



Graphique 5.7 : Analyse de composition en surface d'une zone endommagée thermiquement sur conducteur d'aluminium provenant d'un incendie

Les résultats de ces analyses ont démontré qu'il s'agissait bien d'un conducteur d'aluminium. Cependant, des contaminants provenant de l'incendie s'étaient déposés en surface. De plus, ce conducteur d'aluminium se trouvant dans une boîte de jonction en acier galvanisé a également été affecté par d'autres métaux comme le fer et le zinc.

En ce qui concerne les métallographies des conducteurs d'aluminium, elles ne révèlent habituellement pas d'indices intéressants pouvant mener à l'interprétation des dommages puisque ce métal fusionne complètement à basse température au cours des incendies. Quoi qu'il en soit, le globule mis en évidence à la figure 5.30, lequel était formé suite à la fusion thermique du conducteur d'aluminium a été coupé et enrobé pour analyse microstructurale. La microstructure ainsi révélée démontrait la présence de dendrites qui sont discernables au centre de la masse fusionnée (figure 5.32).

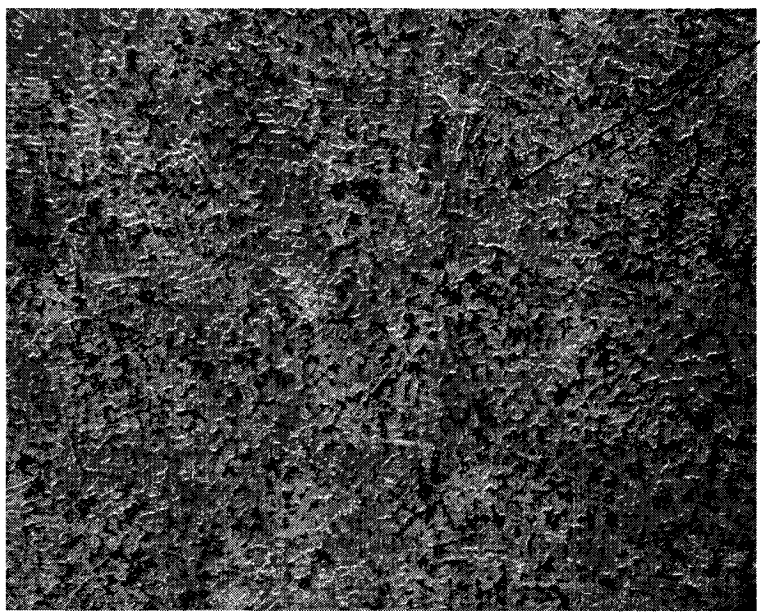


Figure 5.32 : Structure dendritique d'un globule formé par un endommagement thermique sur un conducteur d'aluminium, Experts-Conseils CEP (2004)

Quant à l'évolution de l'oxygène et de l'aluminium dans les zones fusionnées thermiquement (figure 5.33), cet aspect a été caractérisé grâce à l'établissement d'un profil d'évolution linéaire de ces éléments (graphique 5.8).

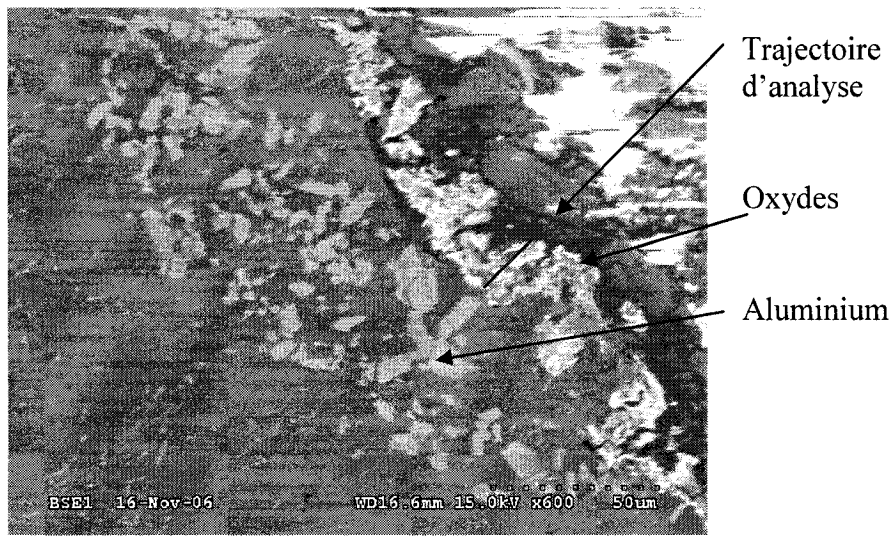
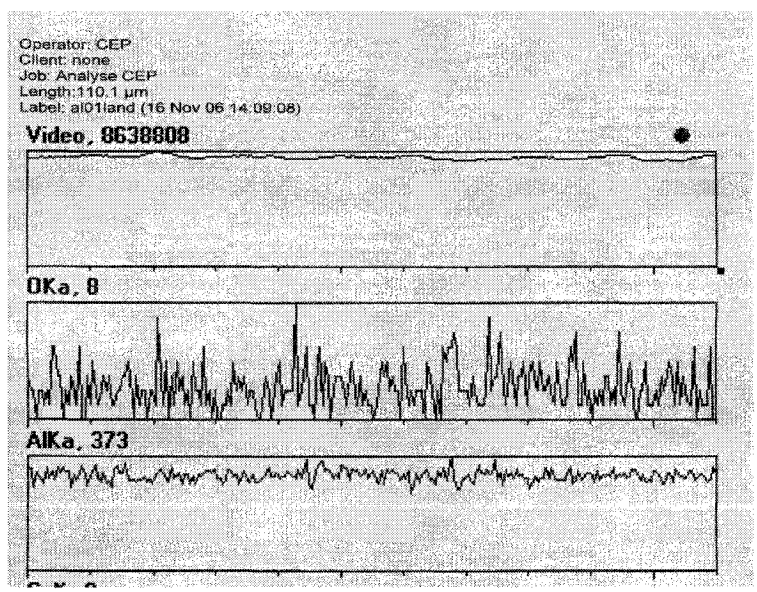


Figure 5.33 : Fusion thermique de l'aluminium en périphérie de l'interface zone fusionnée et matériel d'enrobage avec trajectoire d'analyse



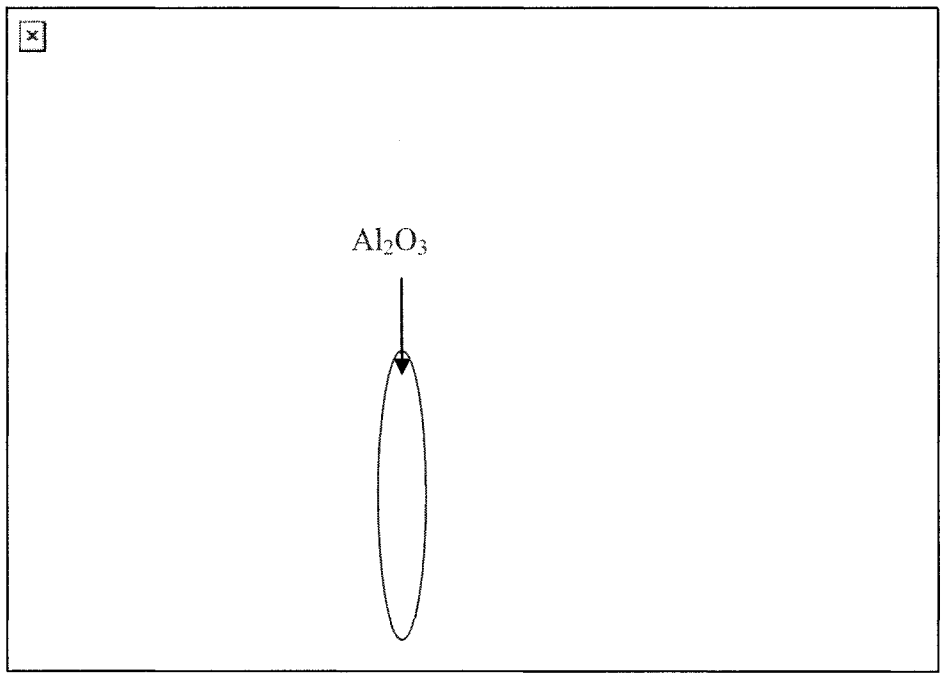
Graphique 5.8 : Analyse de l'oxygène et de l'aluminium dans la zone de trajectoire dans l'oxyde

Tout comme c'était le cas pour les régions endommagées thermiquement avec le cuivre, celles de l'aluminium ne révèlent également aucune tendance entre la réaction entre l'oxygène et l'aluminium dans ces régions particulières. Cependant, il est certain qu'il y a formation d'oxydes au pourtour de ces régions

En résumé, les diverses caractéristiques morphologiques de l'aluminium fondu ressemblent fortement à celles décrites dans le cas du cuivre pour la fusion initiale sans perte de métal. Cependant, puisque la température de fusion de l'aluminium est nettement inférieure à celle du cuivre, la plupart des conducteurs observés suite à un incendie ne sont plus complets et présentent plusieurs sections manquantes. Ceci est dû au fait que la température moyenne atteinte lors de ce sinistre avoisine les 800°C. Dans ces circonstances, il peut être très difficile d'apprécier les dommages observés sur les conducteurs d'aluminium pour en tirer des conclusions pouvant aider la compréhension, la détermination de l'origine et la cause ainsi que le développement de l'incendie.

5.1.4 Fusion du cuivre et de l'aluminium

Revenons brièvement sur les principes métallurgiques qui régissent l'interaction entre le cuivre et l'aluminium. Il est connu et documenté que ces deux métaux peuvent, à certaines plages de températures et de compositions, interagir à l'état liquide et engendrer la formation d'intermétalliques dont la température de fusion sera inférieure à celle du cuivre, de sorte que certaines pertes de métal pourront être observées en surfaces des conducteurs de cuivre ayant été affectés par l'aluminium. Le tout est possible si la température ambiante et les conditions nécessaires sont rencontrées. De fait, le graphique 5.9 suivant montre justement les divers intermétalliques entre le cuivre et l'aluminium et les températures de fusion de ceux-ci.



Graphique 5.9 : Diagramme de phases entre l'aluminium et le cuivre, SGTE Collection (2004)

5.1.4.1 Examens macroscopiques et microscopiques

Lors d'un incendie, il arrive fréquemment de rencontrer des situations où des interactions possibles entre le cuivre et l'aluminium ont pu se produire. Dans ces circonstances, l'examen et l'interprétation des endommagements demeurent un point important dans l'établissement du phénomène ayant entraîné lesdits endommagements. En fait, l'interaction entre le cuivre et l'aluminium laisse des marques distinctives en surface du conducteur de cuivre, soit des régions caractérisées par un changement de coloration dans certains cas (figure 5.34). Cependant, il n'est pas toujours possible d'apprécier ce changement de coloration à l'œil, surtout si les températures ont permis l'oxydation des conducteurs et la fusion complète des intermétalliques qui se sont détachés de la surface du conducteur de cuivre. Par contre, les régions où l'interaction

entre ces deux métaux s'est produite sont toutefois discernables puisqu'elles laissent des cratères, dépressions ou protubérances en surface du conducteur de cuivre.

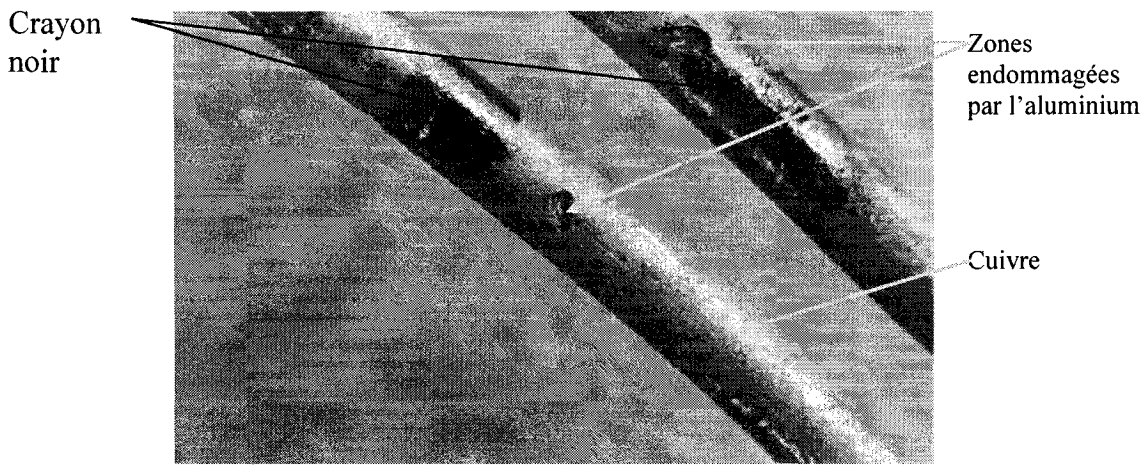


Figure 5.34 : Endommagements thermiques par alliage entre l'aluminium et le cuivre en surface d'un conducteur de cuivre récupéré d'une scène d'incendie

Selon le graphique 5.9 précédent, l'intermétallique fait de cuivre et d'aluminium le plus susceptible de se former serait celui à environ 33% atomique de cuivre ($CuAl_2$) et dont la température de fusion environnerait les 600 °C. Ainsi, compte tenu de sa basse température, cet intermétallique est sujet à fusionner complètement lors des incendies et même à se déloger de la surface des conducteurs de cuivre.

Les divers échantillons prélevés sur des scènes d'incendie ainsi que ceux endommagés en laboratoire ont révélé des caractéristiques morphologiques intéressantes quant à la résultante de l'interaction entre l'aluminium et le cuivre. Lorsque ces deux métaux entrent en contact et que la température du milieu ainsi que divers autres facteurs dont notamment l'orientation du conducteur permettent le dépôt et la subsistance de l'aluminium en surface du cuivre, les endommagements ainsi créés sont de la couleur de l'aluminium et représentent des protubérances ou amoncellements

(figure 5.35). En fait, il est facile de distinguer macroscopiquement la nature de ces deux métaux dont la coloration est différente.

Quant à la caractérisation à plus fort grossissement, elle dévoile également des différents aspects indiquent la présence d'un autre métal sur le conducteur de cuivre (figure 5.36). Il est intéressant de noter que la surface du conducteur de cuivre présente une légère dépression au pourtour de la région endommagée par l'aluminium alors que le centre constitue plutôt un amoncellement de ce même métal. L'aspect du fini de surface est similaire à celui décrit à la section 5.1.3 pour l'aluminium fusionné thermiquement sur lequel a crû les oxydes d'aluminium.

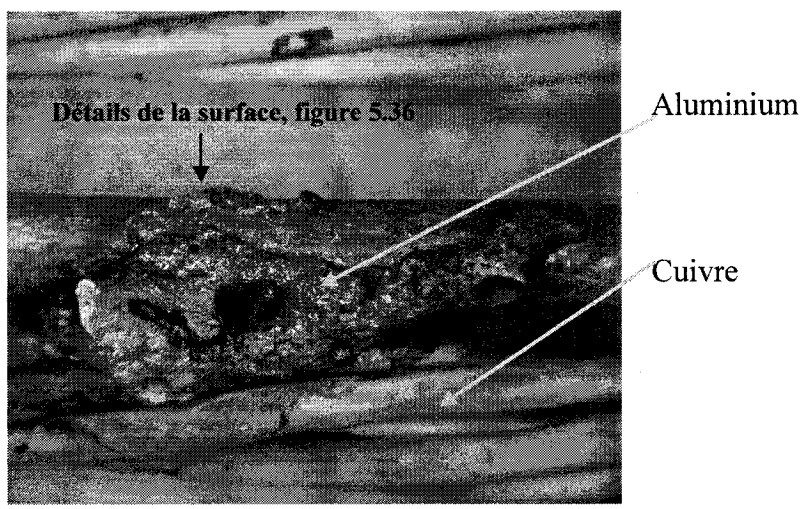


Figure 5.35 : Dépôt d'aluminium sur un conducteur de cuivre endommagé thermiquement, Experts-Conseils CEP (2003)

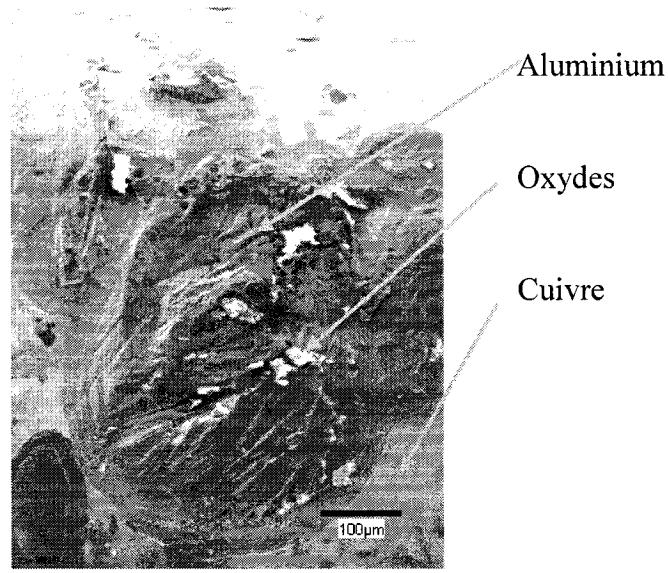
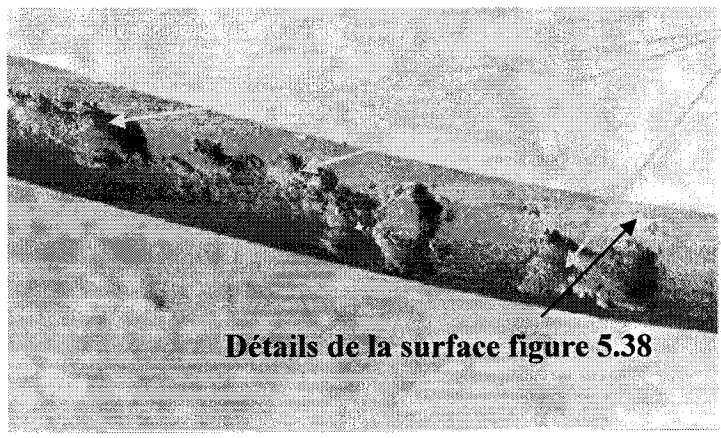


Figure 5.36 : Surface de l'aluminium et de l'oxyde d'aluminium déposé sur un conducteur de cuivre au microscope électronique à balayage

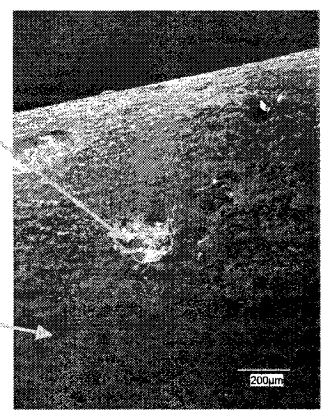
Lorsque les températures d'un incendie permettent également la fusion partielle du cuivre ou du moins, sont suffisamment élevées pour engendrer la fusion des intermétalliques résultant du dépôt de l'aluminium sur le cuivre, il en résulte des cratères ou dépressions en surface du conducteur (figures 5.37 et 5.38). Cependant, puisqu'il y a fusion et même diffusion entre les deux métaux, il n'est pas toujours possible de reconnaître la coloration argentée de l'aluminium au fond des cratères. Or, le fait que des dommages aussi géométriques se retrouvent en surface des conducteurs de cuivre révèle qu'un phénomène particulier s'est produit à cet endroit précis. Dans ces circonstances, des observations microscopiques ainsi que des analyses de composition de surface permettent d'identifier les éléments qui sont présents à l'intérieur desdits cratères.



Zones endommagées par l'aluminium

Cuivre

Figure 5.37 : Dépressions engendrées par l'interaction à haute température de l'aluminium sur un conducteur de cuivre (2002)



Intermétalliques et oxydes dans un cratère

Cuivre

Figure 5.38 : Présence aluminium dans un cratère en surface d'un conducteur de cuivre

Ainsi, les régions endommagées sont nettement définies et la surface des conducteurs de cuivre environnant ces régions ne montre pas de signe attribuable à de la fusion thermique. En effet, les endommagements sont relativement circonscrits en des cratères dont l'intérieur est teinté d'une coloration autre que celle du cuivre. Cette coloration s'apparente à celle de l'aluminium dans certains cas. Mentionnons que la température ambiante, puisque ces échantillons sont tirés de scènes d'incendie, a été inférieure à celle de fusion du cuivre et c'est la raison pour laquelle les conducteurs portent encore des marques de tréfilage. Cependant, la température a été supérieure à celle de fusion de l'aluminium et celle de l'intermétallique $CuAl_2$ créé par l'interaction

des deux métaux puisqu'une certaine partie du conducteur de cuivre ne se trouve plus en place mais a plutôt été dissoute lors de l'incendie.

À plus fort grossissement dans les cratères créés par l'interaction thermique de l'aluminium et du cuivre, l'aluminium et son oxyde laissent des marques et des signes distinctifs comme des arêtes vives et des craquelures. En ce qui concerne les régions où il y a en dissolution du cuivre par l'aluminium suite à la formation d'intermétalliques, il peut arriver que les restes du métal ayant causé cette interaction, soit l'aluminium et son oxyde, s'observent dans les cratères .

De plus, l'oxyde d'aluminium n'ayant pas la même densité que l'aluminium et le cuivre engendre, comme il a été mentionné à la section 5.1.3, des fissures liées à la solidification des intermétalliques. Ainsi, dans les cratères, des caractéristiques très intéressantes peuvent être relevées. En effet, il est possible d'identifier, dans les zones endommagées, un phénomène de corrosion, fissuration ou attaque intergranulaire, laissant ainsi les grains de cuivre, d'une taille environnant les 25 microns en moyenne, visibles au fond des cratères où l'aluminium a dissout le cuivre pour former des intermétalliques à bas point de fusion qui se sont délogés de la surface (figures 5.39 et 5.40).

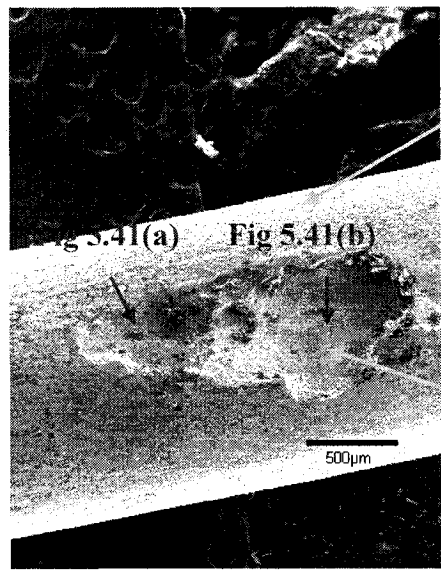
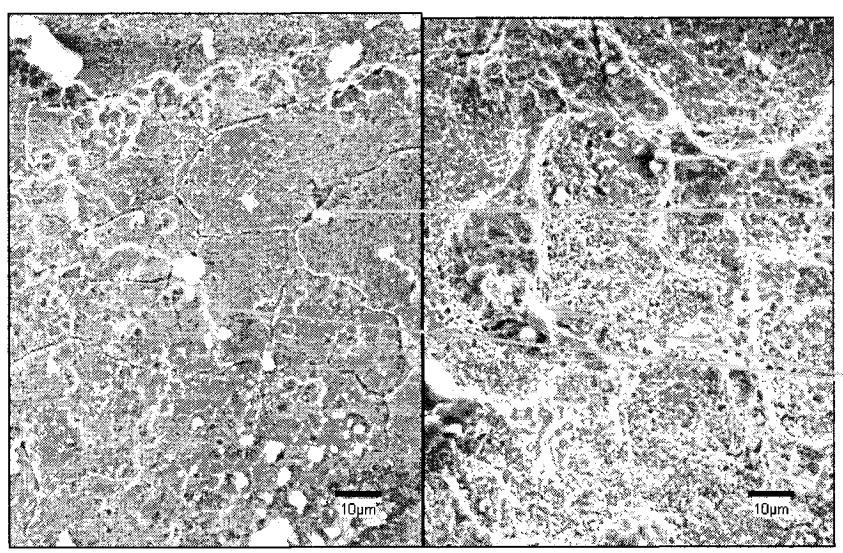


Figure 5.39 : Cratère engendré par la réaction de l'aluminium et du cuivre à 800°C, endommagement créé en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2003)



(a) (b)

Figure 5.40 : Surface au fond du cratère (a) et au pourtour (a) caractérisée par la présence d'aluminium (intermétalliques) et d'oxydes sur un conducteur de cuivre

5.1.4.2 Analyse de composition par EDS et analyse microstructurale

Ce sont vraiment les analyses de composition dans les divers endommagements qui permettent de déterminer les métaux en présence, et ainsi caractériser la nature des dommages. Dans le cas des conducteurs de cuivre ayant été affectés par de l'aluminium, les résultats des analyses de composition en surface diffèrent de ceux présentés à la section 5.1.1.2 précédente. En effet, il y a présence, dans les cratères, d'aluminium alors que le conducteur est fait de cuivre.

Plus précisément, la figure 5.41 suivante montre les différents emplacements où ont été réalisées les analyses de composition de surface présentées aux graphiques 5.10 à 5.12. Ainsi, plus nous nous rapprochons de la zone endommagée, plus la quantité d'aluminium détectée devient importante, même si ce n'était pas évident en terme de coloration qu'il ait pu y avoir présence d'aluminium dans cette région. En fait, le graphique 5.10 présente les résultats de l'analyse de composition sur la surface générale du conducteur de cuivre. Il ressort que le cuivre est prédominant et qu'il existe quelques contaminants. En se rapprochant de la zone endommagée par de l'aluminium, les quantités détectées d'aluminium augmentent, comme montré au graphique 5.11 illustrant les résultats de l'analyse au pourtour de la zone endommagée. Finalement, en plein centre de la région endommagée, c'est la présence de l'aluminium qui domine (graphique 5.12), même si la coloration de la dépression n'est pas celle de l'aluminium. Les résultats de ces analyses confirment donc qu'il y a eu formation d'intermétalliques entre le cuivre et l'aluminium, et qu'une portion de ces intermétalliques s'est délogée du conducteur de cuivre.

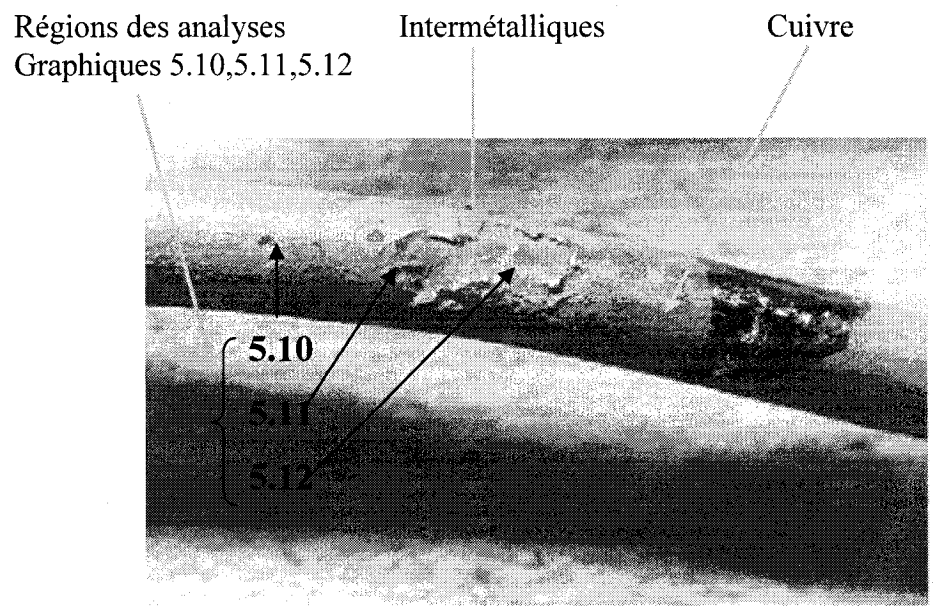
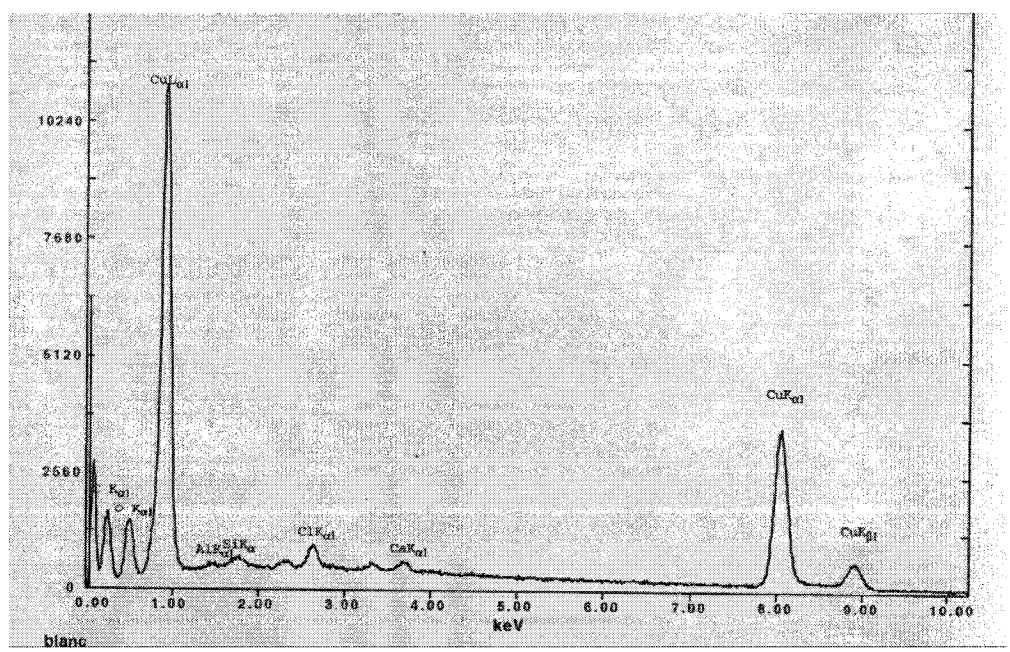
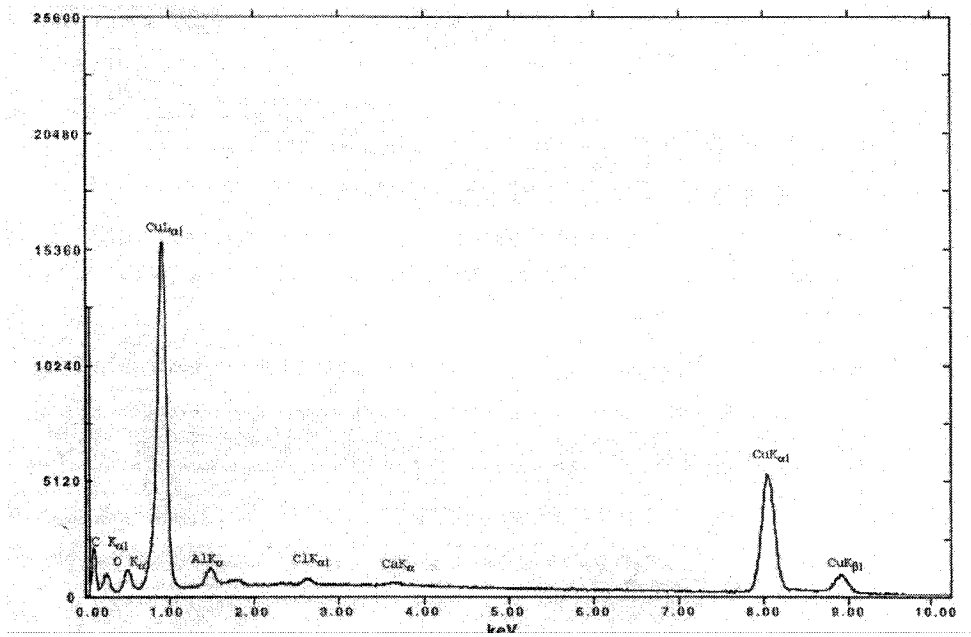


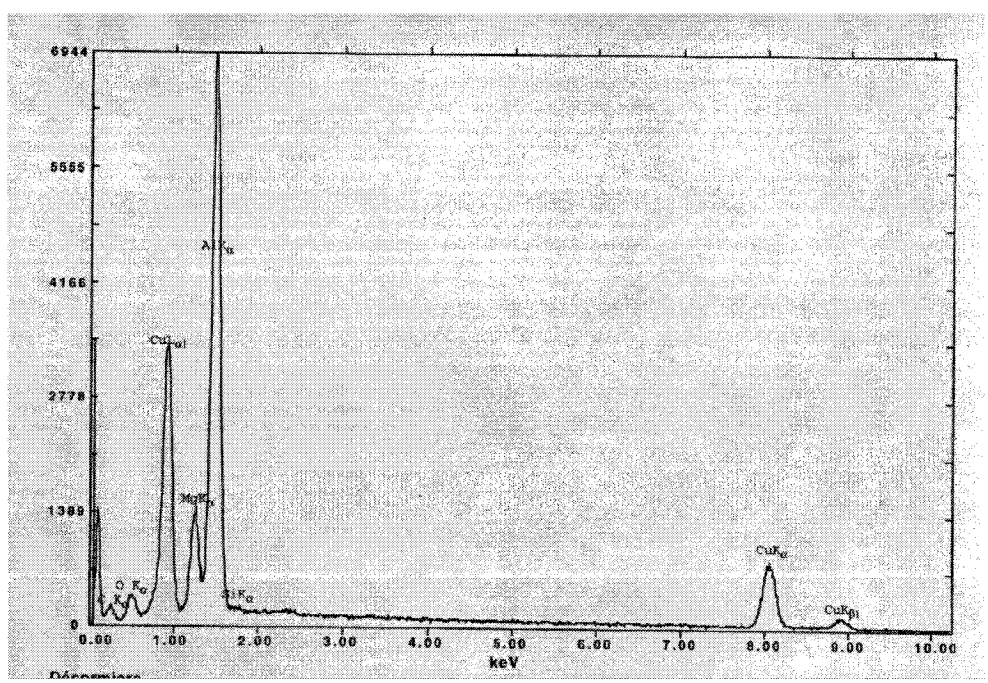
Figure 5.41 : Emplacement des analyses de composition EDS faites au MEB, sur un conducteur de cuivre affecté thermiquement par de l'aluminium



Graphique 5.10 : Analyse de composition sur la surface d'un conducteur de cuivre



Graphique 5.11 : Analyse de composition sur la surface d'un conducteur de cuivre, au bord d'un cratère



Graphique 5.12 : Analyse de composition dans le cratère formé par les intermétalliques entre l'aluminium et le cuivre

En ce qui concerne les métallographies des endommagements thermiques entre le cuivre et l'aluminium, celles-ci révèlent la perte des intermétalliques ainsi formés en laissant des dépressions importantes (figure 5.42).

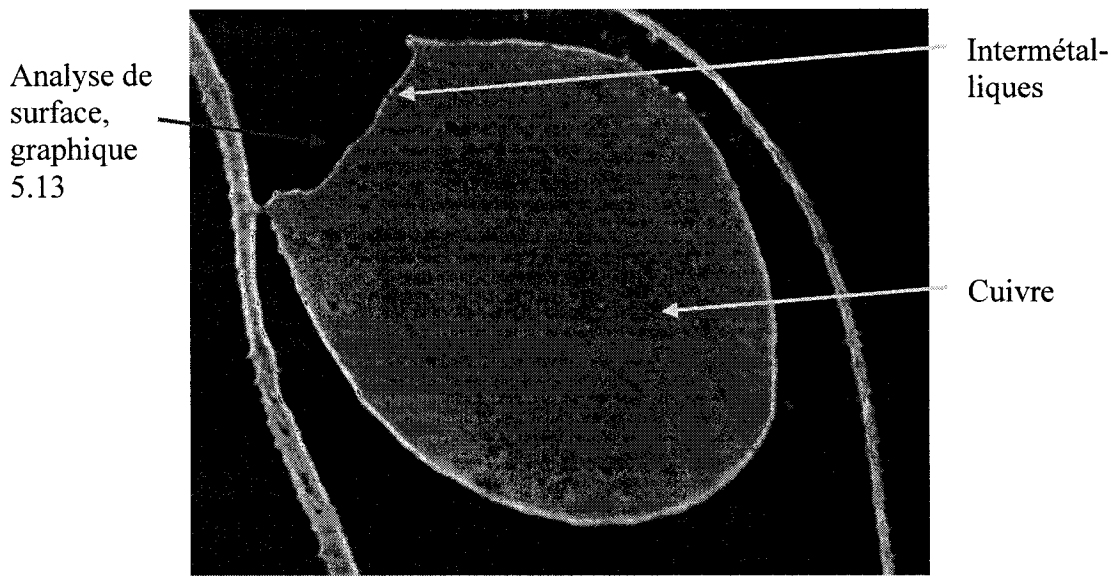
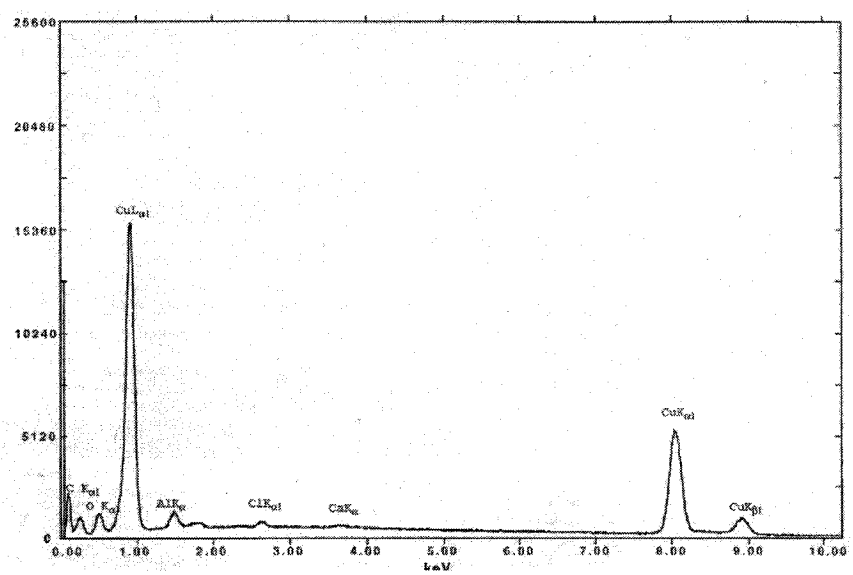


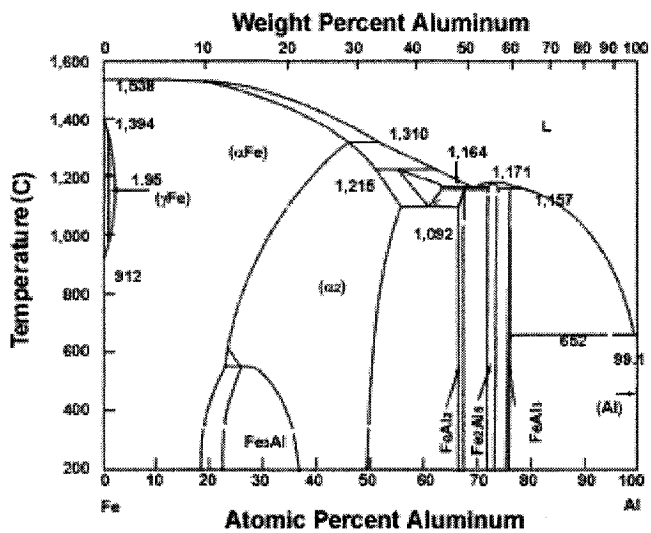
Figure 5.42 : Conducteur de cuivre endommagé thermiquement par de l'aluminium et dont les intermétalliques se sont détachés de la surface, MEB 25X



Graphique 5.13 : Analyse de la composition du conducteur de cuivre de la zone endommagée par fusion par de l'aluminium

5.1.5 Fusion de l'acier et de l'aluminium

Le fer et l'aluminium forment, tout comme le cuivre et l'aluminium, plusieurs intermétalliques dont la température de fusion est inférieure à celle de l'acier (fer), comme montré au graphique 5.14 suivant. Nous réitérons que la température de fusion de l'acier n'est pas atteinte lors des incendies, même lorsqu'il est question d'intenses brasiers. Cependant, il est fréquent de retrouver des conducteurs d'acier, dont notamment le neutre porteur utilisé dans la fabrication des câbles d'alimentation en aluminium, portant des marques, dépressions et cratères en surface, lesquels peuvent poser problème lors de l'interprétation de leur signification. En se référant au graphique ci-dessous, nous constatons que plusieurs intermétalliques entre l'aluminium et le fer ont des températures de fusion de l'ordre de 1100°C, soit inférieures à la température de fusion de l'acier ($FeAl_3$, Fe_2Al_5, $FeAl_2$).



Graphique 5.14 : Diagramme de phases fer-aluminium, SGTE Collection

5.1.5.1 Examens macroscopiques et microscopiques

La différence de coloration entre la surface d'un conducteur d'acier et celle d'un conducteur d'aluminium est assez faible. En effet, ces deux métaux peuvent être caractérisés par une teinte grisâtre, argentée. Cependant, l'aluminium et son oxyde (Al_2O_3) sont tout de même plus brillants que l'acier. De plus, à haute température, les oxydes de fer tendent à se former en surface, lesquels sont de couleur rougeâtres, rendant donc clairement identifiables les dépôts d'aluminium en surface qui sont plus brillants (figure 5.43).

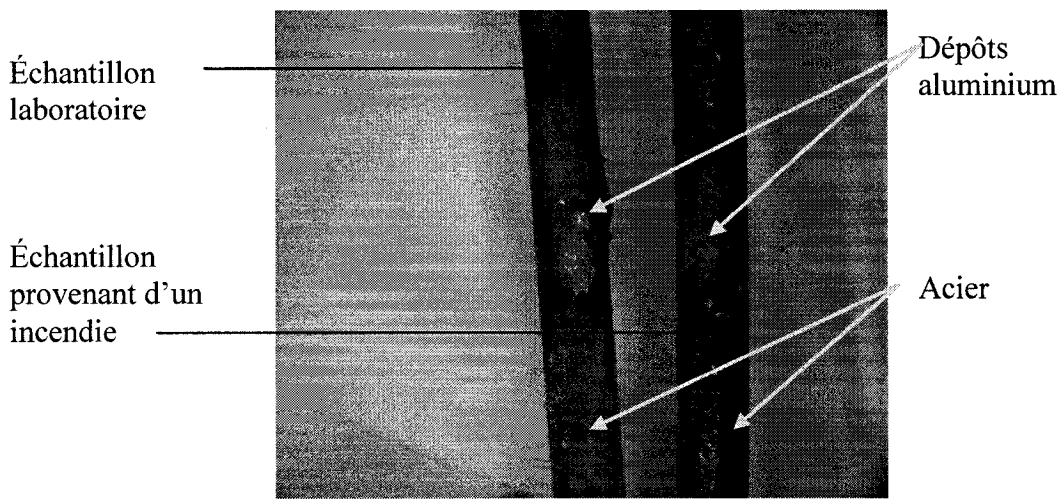


Figure 5.43 : Dépôts d'aluminium en surface de conducteurs occasionnés par des endommagements thermiques

La morphologie des dépôts d'aluminium sur les conducteurs d'acier est telle que ceux-ci peuvent s'étendre en une masse entourant le conducteur (figure 5.44), ou être plutôt déposés et former un amoncellement en surface.

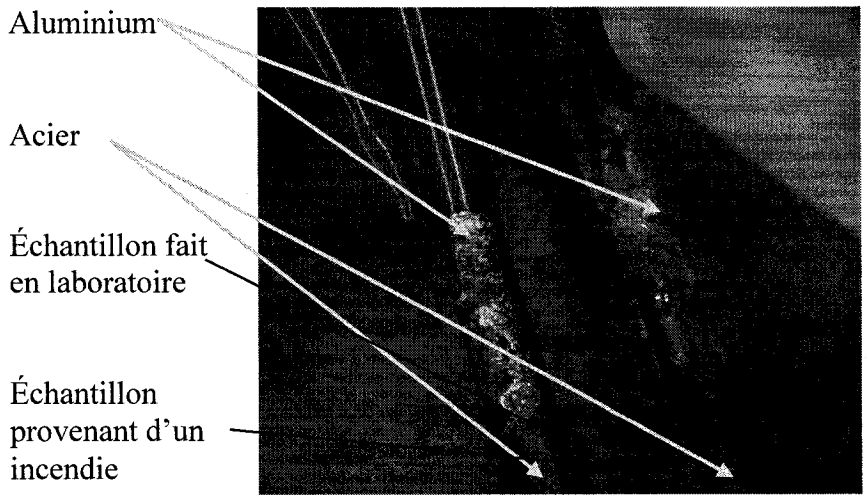


Figure 5.44 : Agglomérations d'aluminium autour de conducteurs d'acier, 2004

Il est de mise de noter que l'aluminium en surface des conducteurs d'acier est recouvert d'oxydes, tout comme la surface générale du conducteur. En effet, les températures élevées générées en laboratoire ou occasionnées lors des incendies ont causé la formation desdits oxydes en surface. Leur présence se note à plus fort grossissement.

En plus des deux métaux que sont l'aluminium et le fer, la température du milieu ainsi que beaucoup d'autres paramètres dont notamment la durée de l'interaction entre ces métaux, peuvent mener à la formation d'intermétalliques dont la température de fusion est inférieure à celle du brin d'acier. Puisque la température de fusion de l'aluminium et celle de certains intermétalliques fer-aluminium demeurent inférieures à celle du milieu, il est possible de noter que ces intermétalliques se sont délogés de la surface du conducteur d'acier qui ne fond pas, laissant alors une dépression en surface ou engendrant une perte localisée de métal (figure 5.45).

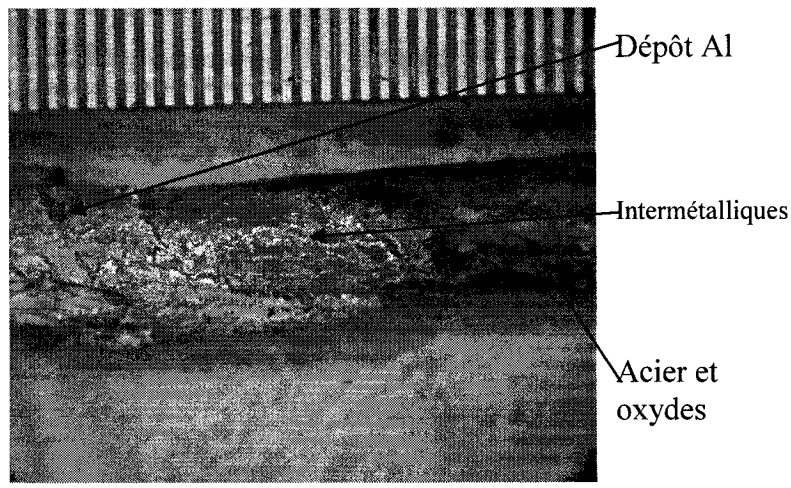


Figure 5.45 : Légère dépression causée par les intermétalliques d'aluminium en surface d'un conducteur d'acier et dépôt d'aluminium, Experts-Conseils CEP 2004

À plus fort grossissement, il ressort des caractéristiques importantes quant à la morphologie des endommagements sur les conducteurs d'acier, et à la présence et l'identification de l'aluminium dans les zones d'intérêt. En effet, l'aluminium crée, sur l'acier, des dépressions et des protubérances par l'entremise de la formation d'intermétalliques. Ainsi, des différenciations sont notées entre le métal de base (l'acier) et celui avec lequel il interagit (l'aluminium) tant au niveau du fini de surface, de la texture, que de la morphologie des oxydes.

Cependant, lorsque les intermétalliques créés entre les deux métaux se sont délogés de l'ensemble puisque les températures ont été suffisantes pour les rendre complètement liquides, la différence entre ces deux métaux du point de vue strictement des colorations macroscopiques est beaucoup plus ardue. Cette différenciation se fait toutefois facilement par un examen microscopique (figures 5.46 et 5.47), où les oxydes de fer laissent des caractéristiques en surface différentes de celles des intermétalliques et de l'aluminium.

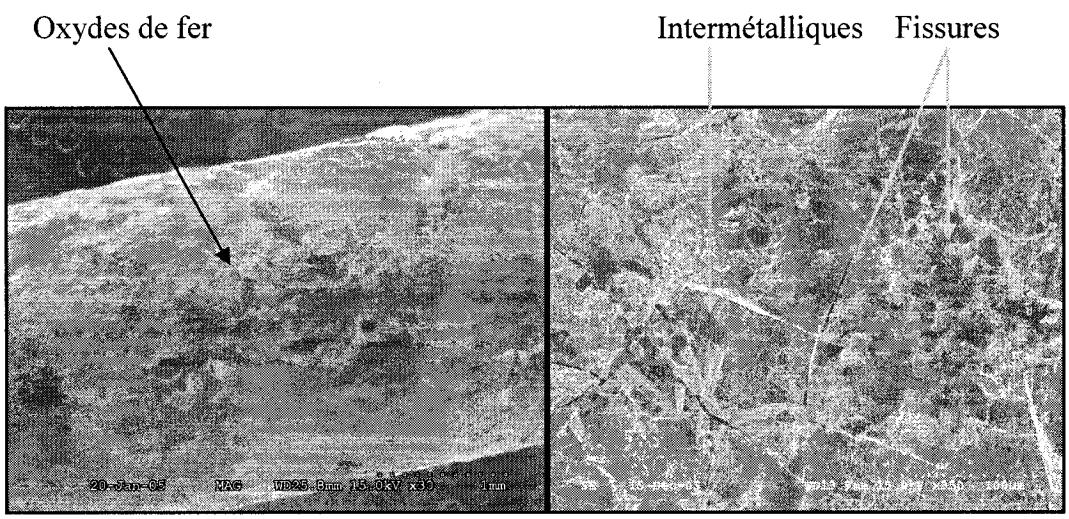
Aluminium

Acier

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

Détails fig.5.48(a) et fig.5.48 (b)

Figure 5.46 : Aluminium, oxydes et intermétalliques sur un conducteur d'acier endommagé par la chaleur



(a) (b)

Figure 5.47 : Dommages engendrés par la réaction thermique entre l'aluminium et l'acier (a) surface du brin d'acier et (b) zone affectée par l'aluminium

Il est intéressant de noter, à cette figure 5.47, que la surface des conducteurs d'acier présente des caractéristiques similaires à celles décrites pour les conducteurs de cuivre affectés par l'aluminium, à la section 5.1.4. En fait, les intermétalliques formés

par l'interaction du fer et de l'aluminium ainsi que l'oxyde d'aluminium ont une texture démontrant diverses aspérités et des arêtes vives, contrairement à la surface du conducteur d'acier qui est beaucoup plus lisse.

De plus, comme il a été le cas pour la réaction entre l'aluminium et le cuivre, la zone endommagée par l'aluminium en surface du brin d'acier montre des fissures dévoilant les grains du conducteur qui ont une taille avoisinant les 50 microns, comme montré à la figure 5.47(b). En fait, c'est sensiblement le même phénomène décrit pour l'interaction entre le cuivre et l'aluminium qui se produit dans ce cas. L'aluminium en contact avec le fer mène à la formation de divers intermétalliques dont certains ont une température de fusion plus basse que le fer. Ils sont donc susceptibles de se déloger de la surface sous l'effet de la chaleur du milieu. La fine couche d'intermétalliques qui subsistera au fond des cratères est recouverte d'oxydes, lesquels ont des densités différentes à celle de l'acier en dessous. Lors de la solidification, des fissures apparaîtront donc aux joints de grains où une certaine quantité d'aluminium liquide aura même pu les attaquer préférentiellement et les dissoudre.

5.1.5.2 Analyses de composition de surface par EDS et microstructures des sections

Afin de connaître la nature des endommagements en surface observés sur les conducteurs d'acier, il est de mise de procéder à des analyses de surface, lesquelles permettent de relever les éléments en présence, lesquels donneront une indication de leur provenance. Ces analyses sont d'autant plus importantes lorsque les dommages semblent de coloration uniforme comme c'est le cas avec l'interaction aluminium-acier.

La figure 5.48 situe les différentes zones où des analyses de composition ont été réalisées, lesquelles sont présentées aux graphiques 5.15 et 5.16. La composition de ces diverses zones et surtout la présence d'éléments autres que ceux constituant le

conducteur demeurent des indications non négligeables dans l'interprétation de la nature des endommagements.

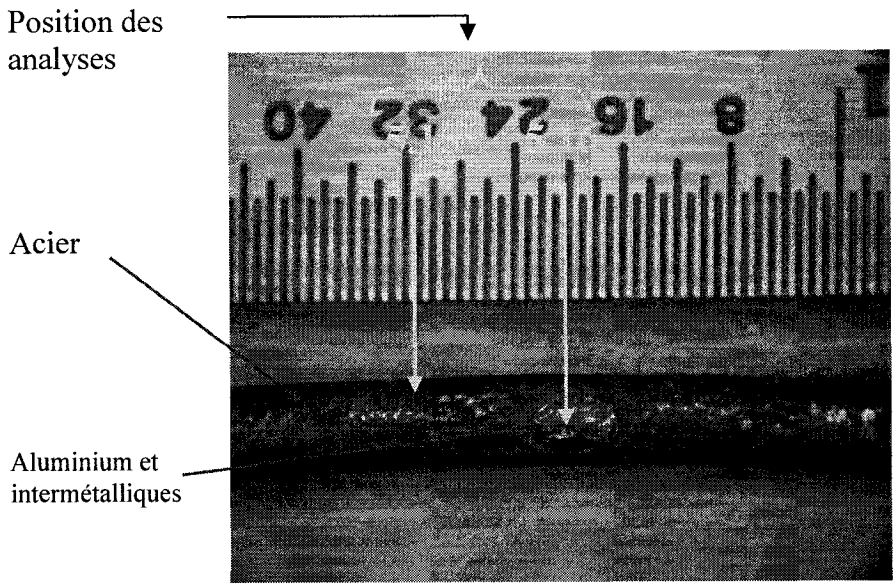
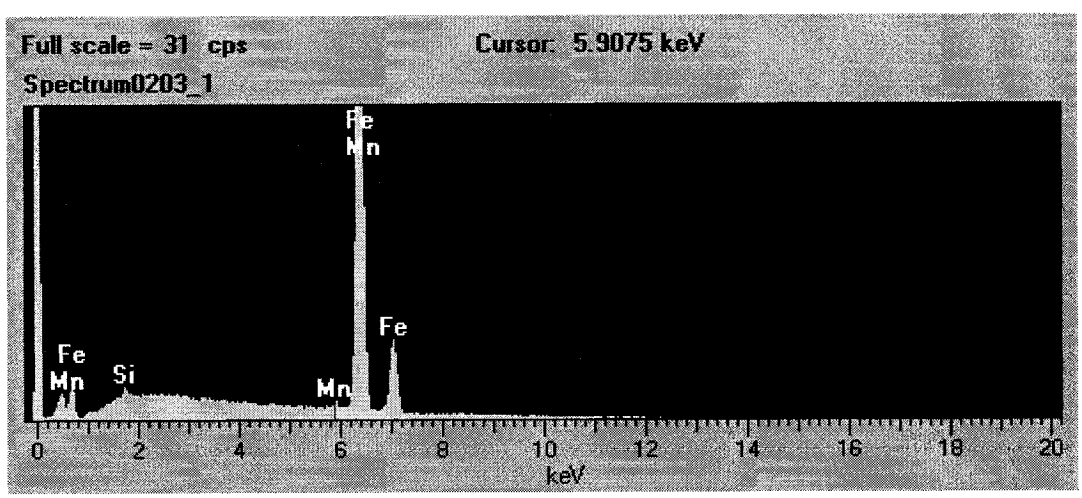
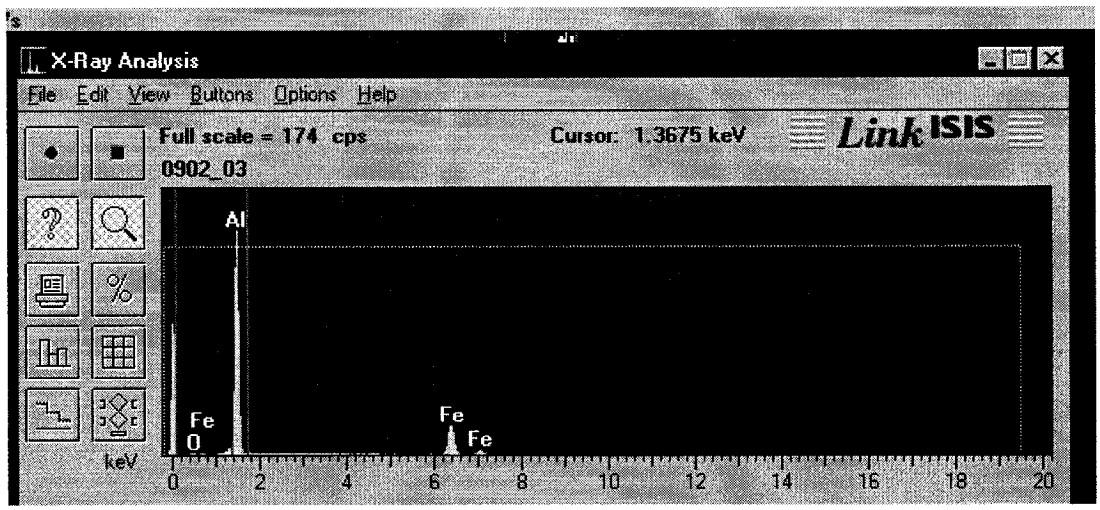


Figure 5.48 : Positionnement des régions pour analyses de composition de surface sur un conducteur d'acier endommagé avec de l'aluminium



Graphique 5.15: Analyse du brin d'acier, Experts-Conseils CEP (2004)



Graphique 5.16 : Analyse dans la zone endommagée sur le conducteur d'acier

Ainsi, les résultats de ces analyses montrent clairement que ce sont des intermétalliques formés avec de l'aluminium et du fer et même de l'aluminium qui sont les éléments prédominants dans la région endommagée thermiquement par de l'aluminium en fusion sur le conducteur d'acier. Il faut se rappeler que les enthalpies de formation des intermétalliques sont très élevées.

Certains brins d'acier ont été coupés transversalement dans la zone où l'aluminium a interagi avec l'acier (figure 5.49) afin de révéler les caractéristiques de cette interaction purement thermique du point de vue de la microstructure (figure 5.50). Il faut mentionner que ces échantillons avaient été soumis à des températures de l'ordre de 800°C. Ainsi, il est clair que l'aluminium s'est déposé en surface et qu'il a mis en solution une certaine quantité d'acier formant le périmètre du brin, par la création d'intermétalliques entre l'aluminium et le fer. De fait, puisque la forme du brin d'acier n'est plus totalement circulaire, la fusion des intermétalliques entre le fer et l'aluminium au cours de l'incendie a entraîné la perte du fer en périphérie.

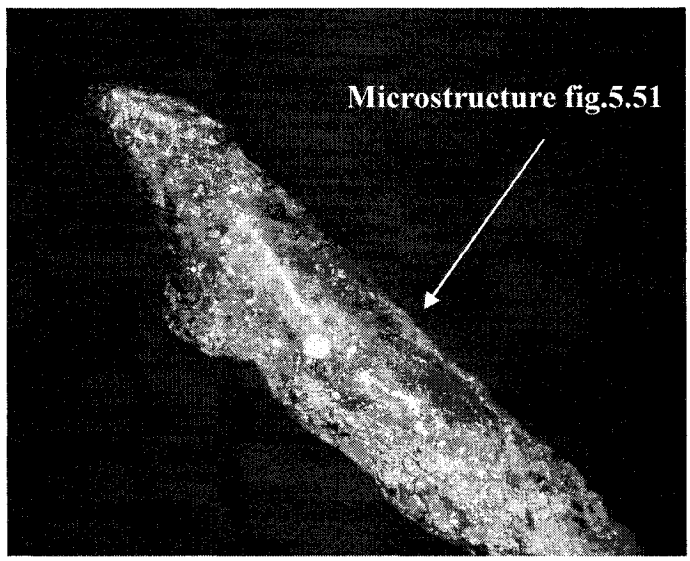


Figure 5.49 : Conducteur d'acier recouvert d'aluminium et d'intermétalliques dont l'endommagement a été fait suite à un incendie

Figure 5.52

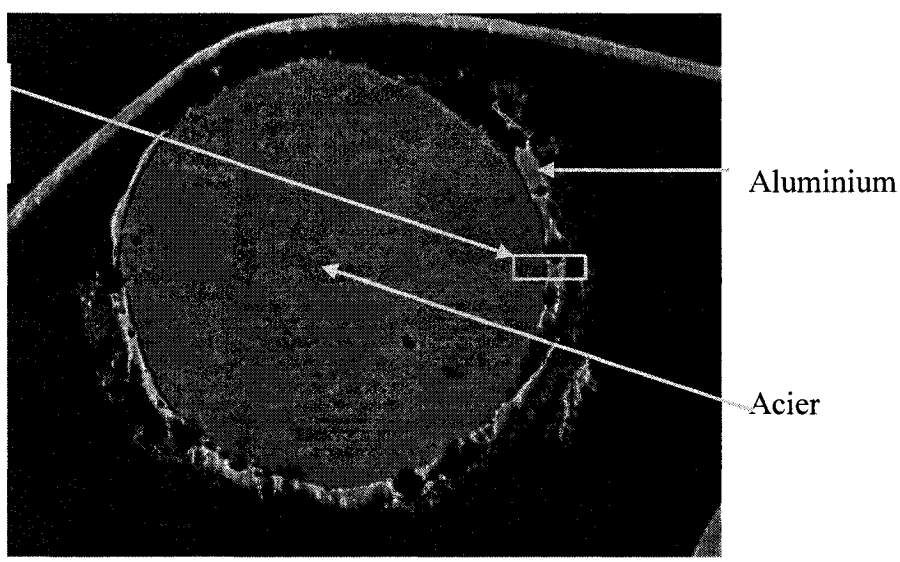


Figure 5.50 : Section à travers un brins d'acier recouvert d'aluminium suite à un endommagement thermique, à 25X

À des grossissements de l'ordre de 800X, la microstructure du conducteur d'acier de la figure 5.50 révèle des grains qui ont sensiblement la même taille, de l'extérieur jusqu'à l'intérieur. Plus précisément, les grains sont pratiquement équiaxes

et d'une taille environnant les 50 microns, indiquant alors que la température environnant le brin a été supérieure à 760°C (température A1 de l'acier) (figure 5.51).

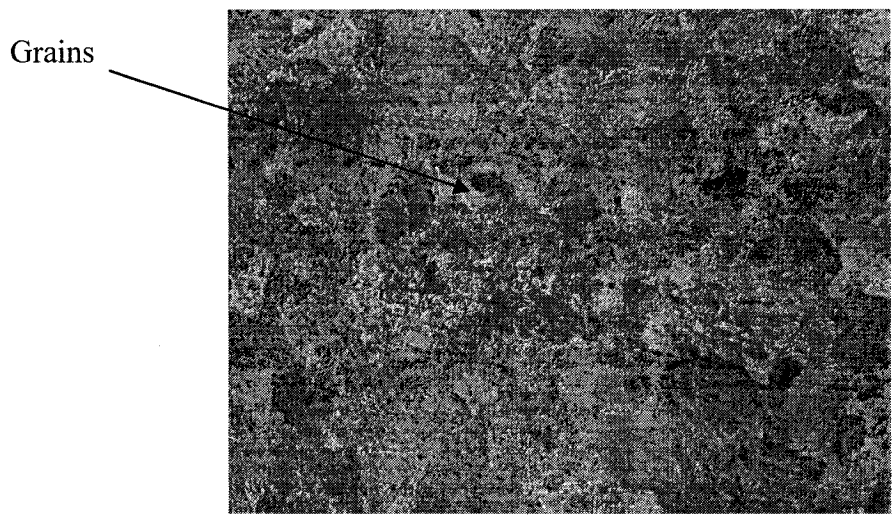


Figure 5.51 : Microstructure centrale d'un brin d'acier ayant été endommagé par de l'aluminium, à 800X

Afin de caractériser l'évolution de l'aluminium et de l'acier (fer) dans la zone sélectionnée à la figure 5.50 précédente, des analyses de la variation de la présence de ces éléments ont été réalisées. En fait, la figure 5.52 montre la zone où des analyses ont été réalisées afin de caractériser le profil de la présence des oxydes et des métaux que sont l'aluminium et le fer (graphique 5.17). Il ressort clairement de ces analyses qu'il y a interaction entre le fer et l'aluminium dans des zones données. En fait, la région caractérisée par les intermétalliques révèle que l'aluminium domine en quantité sur le fer, mais qu'il y a réaction entre ces deux métaux. Cependant, il n'est pas possible d'après ces analyses de déterminer de quel(s) intermétallique(s) il s'agit. Quant aux autres régions, elles indiquent que le fer est surtout au centre du conducteur d'acier alors que le dépôt extérieur est principalement constitué d'aluminium.

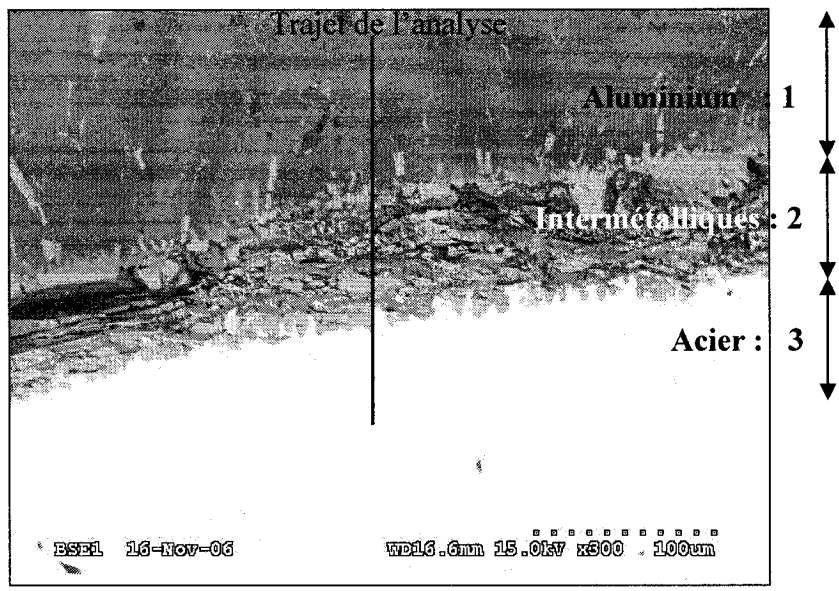
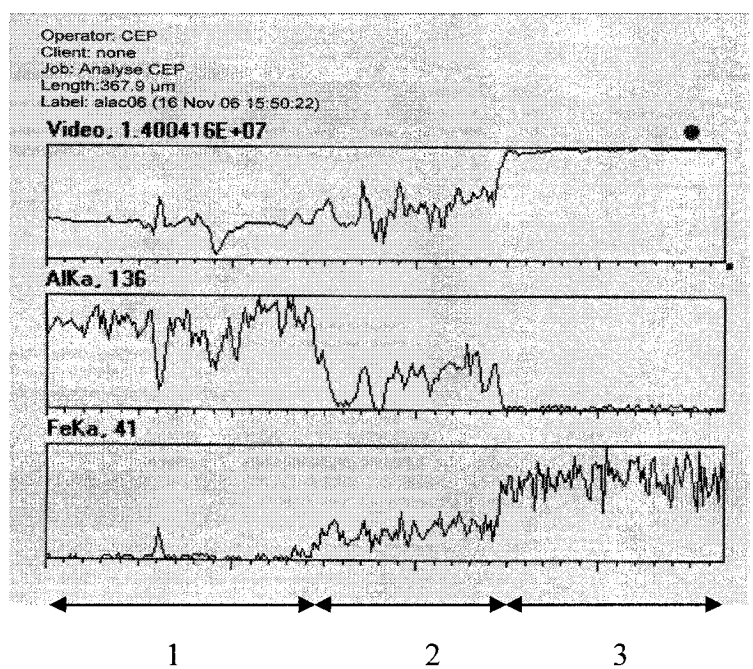


Figure 5.52 : Zone d'interaction entre le fer et l'aluminium sur un conducteur d'acier endommagé thermiquement par l'aluminium



Graphique 5.17 : Évolution de l'aluminium et du fer dans la zone d'interaction entre les deux métaux montrées à la figure 5.52

Les interactions entre l'aluminium et le fer du brin d'acier peuvent engendrer également, comme c'était le cas pour le cuivre et l'aluminium, des pertes du pourtour du conducteur d'acier liées à la fusion et au délogement de la surface du brin des intermétalliques (figure 5.53). En effet, comme il a été démontré précédemment, les intermétalliques entre le fer et l'aluminium ont des températures de fusion inférieures à celle de fusion de l'acier (T <1200°C), d'où leur fusion possible lors d'un incendie.

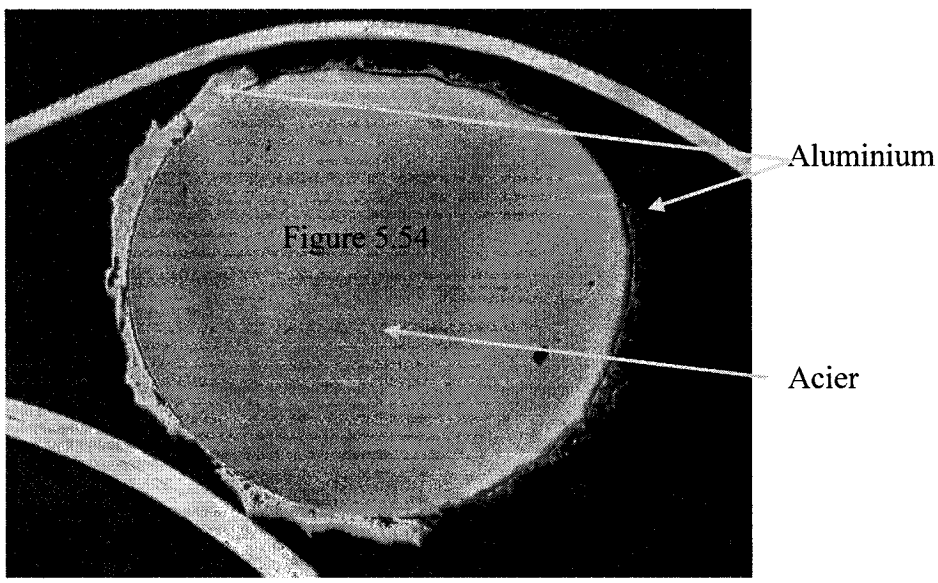


Figure 5.53 : Brin d'acier recouvert d'aluminium suite à leur interaction thermique(25X), Experts-Conseils CEP (2005)

À plus fort grossissement, la microstructure centrale de ce brin d'acier recouvert d'aluminium démontre la présence de restes de perlite (perlite résiduelle) et de nouveaux grains (figure 5.54). Cette différence avec la microstructure montrée à la figure 5.51 révèle que la température atteinte dans ce cas a été inférieure, d'où la présence de perlite résiduelle.

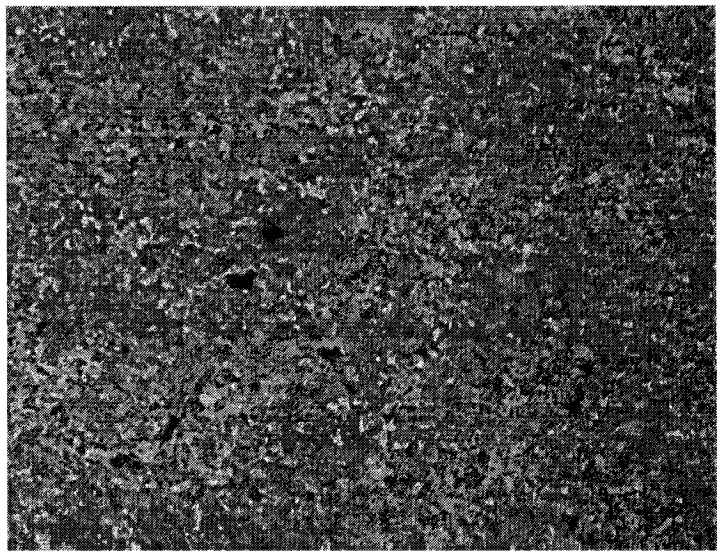


Figure 5.54: Grains équiaxes et perlite résiduelle de la microstructure centrale du brin d'acier de la figure 5.53 d'un brin d'acier endommagé par de l'aluminium (800X)

Des métallographies longitudinales ont également été réalisées sur plusieurs brins d'acier affectés thermiquement par de l'aluminium. Les microstructures ainsi révélées démontraient des aspects similaires à ceux tirés de l'examen des microstructures transversales. En fait, les températures rencontrées lors d'un incendie avaient effacé les signes liés à la mise en forme et à la fabrication du brin d'acier (figures 5.55 et 5.56), laissant ainsi des grains équiaxes et uniformes et non étirés comme il l'étaient initialement. Il est à noter que ces conducteurs ont été chauffés à des températures permettant la fusion de l'aluminium autour, soit supérieures à 660°C.

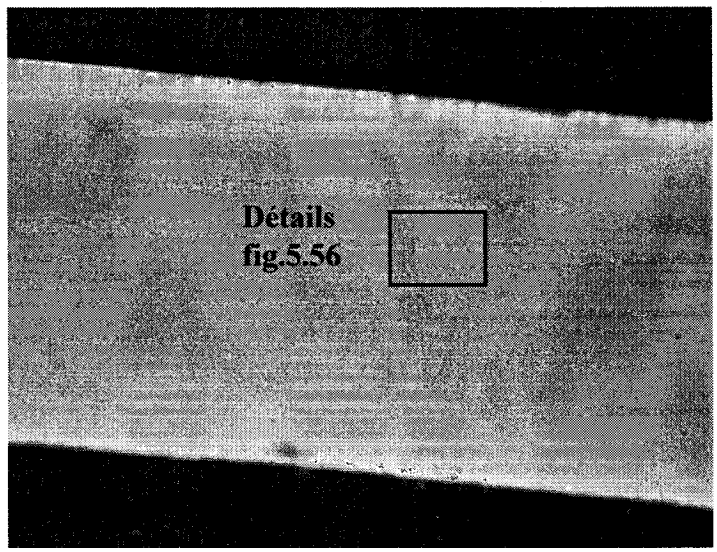
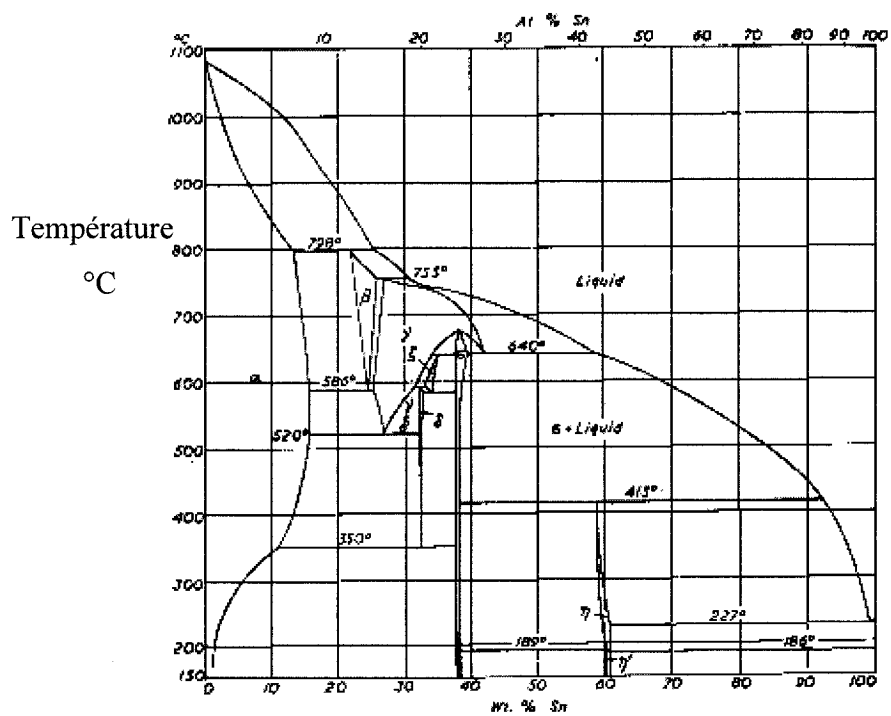


Figure 5.55 : Microstructure transversale d'un brin d'acier affecté thermiquement par de l'aluminium dans un milieu d'incendie (25X)

Figure 5.56 : Grains de la zone encadrée au centre d'un brin d'acier affecté par de l'aluminium et soumis à un incendie (500X)

5.1.6 Fusion du laiton et de l'étain

Tel qu'il a été exposé préalablement dans ce mémoire, le cuivre du laiton (alliage Cu-Zn) réagit avec l'étain présent sur les surfaces de certaines pièces pour également former des intermétalliques et ce, uniquement à haute température. Nous parlons du cuivre parce que c'est ce métal précisément qui réagit avec l'étain, et non le zinc, comme montré au graphique 5.18. Les intermétalliques formés entre le laiton et l'étain n'impliquent donc que le cuivre et l'étain. En fait, l'étain peut se déposer à la surface ou, tout dépendant des températures ambiantes, entrer en contact avec le cuivre pour former des intermétalliques qui ont des températures de fusion inférieures à celles du cuivre, de sorte qu'ils peuvent se liquéfier et quitter la surface de la pièce de laiton ou de cuivre, laissant ainsi une dépression à la surface.



Graphique 5.18 : Diagramme de phase cuivre-étain, SGTE Collection

5.1.6.1 Examens macroscopiques et microscopiques

Les interactions entre l'étain et le laiton s'apparentent à celles entre l'aluminium et le cuivre en ce sens qu'elles laissent en surface une coloration argentée typique d'un dépôt d'étain alors que le laiton est de couleur jaunâtre. Les figures 5.57 et 5.58 suivantes montrent justement la surface de pièces de laiton exposée à de l'étain.

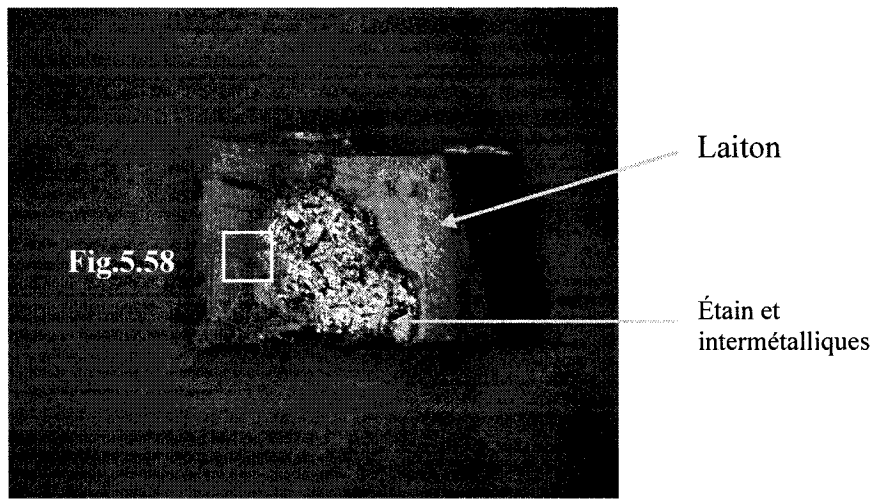


Figure 5.57 : Endommagement thermique du laiton d'un contacteur par l'étain liquide, fait en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2004)

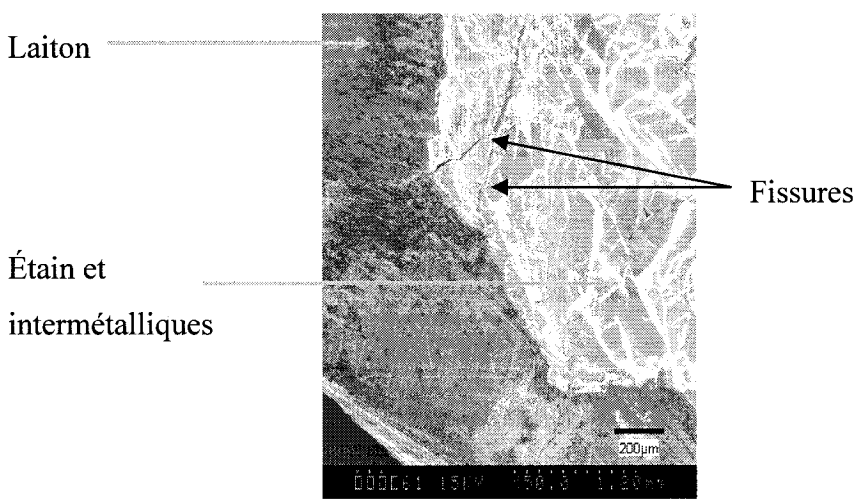


Figure 5.58 : Zone d'interaction du laiton endommagée thermiquement par de l'étain

Les figures 5.57 et 5.58 démontrent que l'aspect des surfaces de la pièce de laiton et de la région endommagée par l'étain est totalement différent. Alors que la pièce de laiton montre des lignes liées à sa fabrication ainsi que des oxydes, la zone endommagée avec de l'étain présente un aspect très cristallographique avec des arêtes vives. De plus, il est possible d'identifier toujours dans la zone endommagée la présence de fissures. Celles-ci sont précisément attribuables à la différence de densité et de propriétés des intermétalliques par rapport à la pièce de laiton. Plus précisément, lors de la solidification qui suit la fusion des intermétalliques entre le laiton (cuivre) et l'étain, il y a adhésion de ces intermétalliques à la surface du laiton qui possède des propriétés différentes, d'où l'apparition de fissures principalement aux joints de grains où l'adhésion était la plus faible.

Il est important de mentionner que les températures contrôlées en laboratoire étaient inférieures à celles normalement rencontrées dans un milieu d'incendie pour simplement ne pas causer la fusion totale de la pièce de laiton. En fait, lors des incendies, plusieurs composants de laiton sont exposés à des hautes températures, de l'ordre de 500°C, sans toutefois être au sein du brasier de sorte qu'ils ne fusionnent pas complètement. La surface de ces pièces présente alors des irrégularités, sans toutefois être fondue, et ces irrégularités sont uniquement attribuables à une interaction de nature thermique entre deux métaux dissimilaires. Ainsi, les zones endommagées ont une coloration argentée typique de l'étain, et elles présentent des arêtes vives (figures 5.59 et 5.60). Tout comme les pièces endommagées en laboratoire, celles prélevées sur un site d'incendie révèlent des caractéristiques similaires dont notamment des fissures aux joints de grains dans la zone formée des intermétalliques de l'étain sur le cuivre du laiton car le zinc ne réagit pas. Encore une fois, ces fissures résultent de la différence des coefficients de dilatation et de compacité entre les intermétalliques et le laiton de la pièce lors de la solidification.

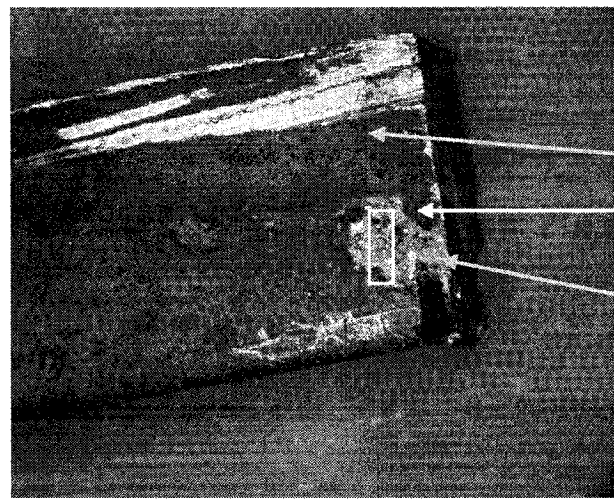


Figure 5.59 : Endommagement thermique d'une pièce de laiton par l'étain, échantillon prélevé sur d'une scène d'incendie (10X)

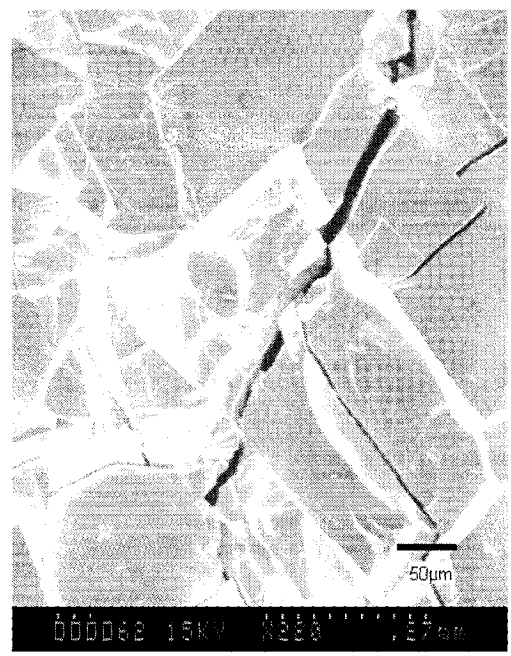


Figure 5.60 : Fissures dans la zone des intermétalliques entre l'étain et le laiton

5.1.6.2 Analyses de composition chimique par EDS et microstructures des sections

La réalisation d'analyses dans les zones endommagées permet de relever la présence des éléments en présence, pour ainsi interpréter leur provenance et leur effet sur les pièces. Dans le cas du laiton, les diverses analyses ont été faites selon la description établie à la figure 5.61.

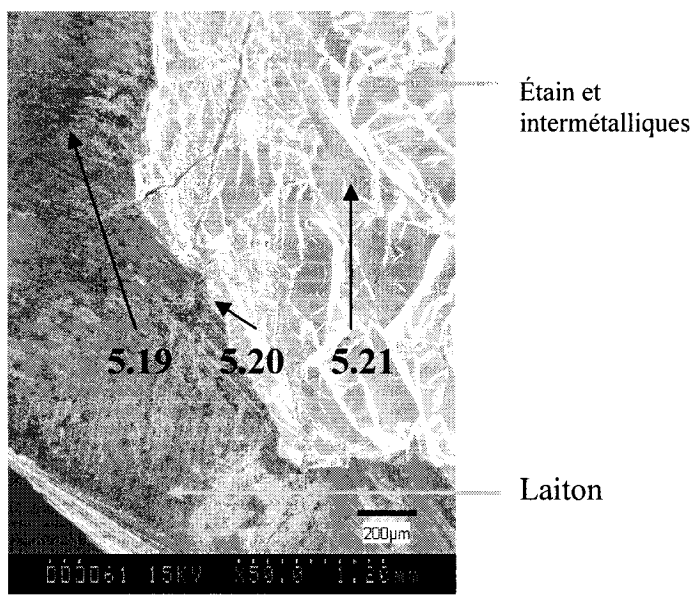
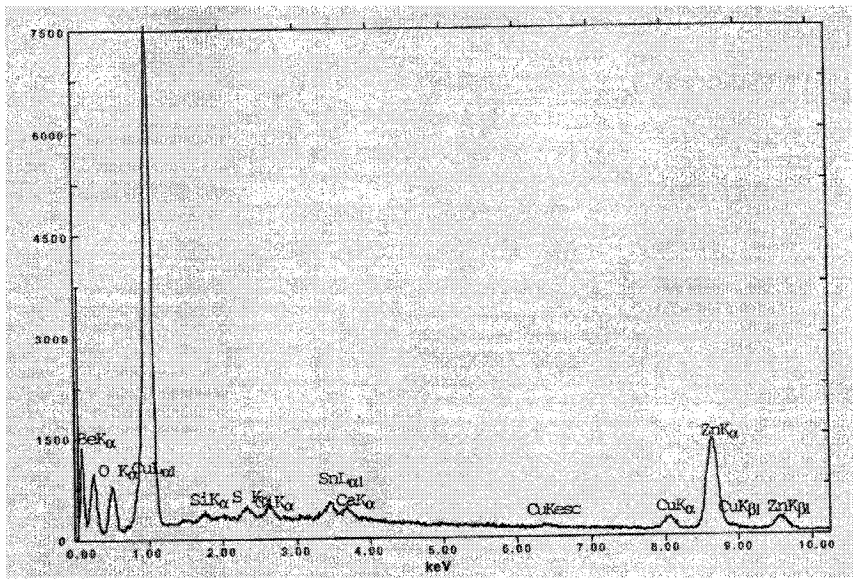
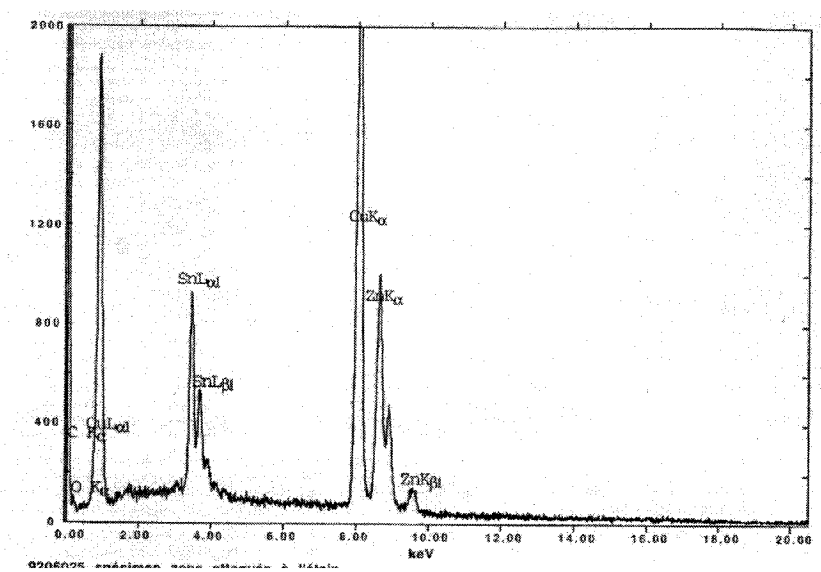


Figure 5.61 : Localisation des analyses de composition de surface sur une pièce de laiton affectée thermiquement par de l'étain, présentées aux graphiques 5.19 à 5.21

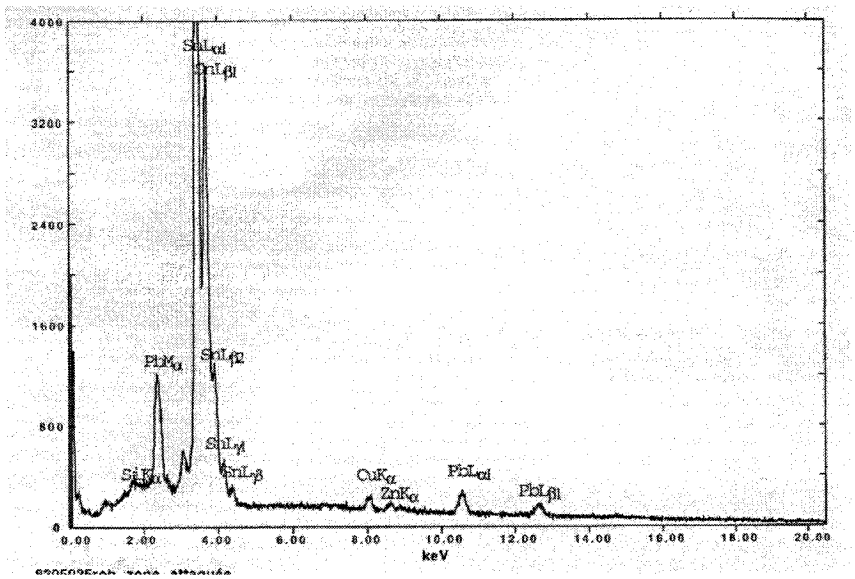
Les trois graphiques suivants (5.19 à 5.21) montrent les éléments retrouvés en surface de la pièce de laiton. Ainsi, au fur et à mesure que nous nous approchons de la zone endommagée, la hauteur du pic d'étain augmente, indiquant alors que cet élément prédomine en surface dans le cratère et que c'est cet élément qui a endommagé la pièce de laiton par la formation d'intermétalliques.



Graphique 5.19 : Analyse de la surface de laiton à l'extérieur de la zone endommagée thermiquement par de l'étain



Graphique 5.20 :: Analyse à l'interface du laiton de la pièce au pourtour de la zone endommagée par l'étain



Graphique 5.21 : Analyse dans la zone riche en étain sur la pièce de laiton

Les métallographiques des pièces de laiton affectées par de l'étain et montrées aux figures 5.58 et 5.60 révèlent que l'étain, en plus de se déposer en surface, mène à la formation d'intermétalliques avec le métal de base, comme montré à la figure 5.62 montrant la microstructure . Il est donc confirmé qu'il y a interaction entre l'étain et le cuivre par la liaison des métaux dissimilaires révélée par cette métallographie. Ainsi, le laiton de la pièce de base se retrouve couvert d'intermétalliques et donc d'étain. Mentionnons que la présence du plomb découle des pièces d'étain utilisées dans le milieu des dispositifs électriques et constitue une impureté. Le plomb se retrouve à l'intérieur de certains sites de l'étain de sorte que ce n'est pas ce métal mais bien l'étain qui réagit avec le cuivre du laiton pour former des intermétalliques;.

De plus, la formation de ces intermétalliques a contribué à la dissolution d'une certaine quantité du laiton. En d'autres mots, le cuivre du laiton ayant réagi avec l'étain a formé des intermétalliques à bas point de fusion, lesquels ont pu se détacher de la pièce initiale pour laisser des dépressions et cratères en surface.

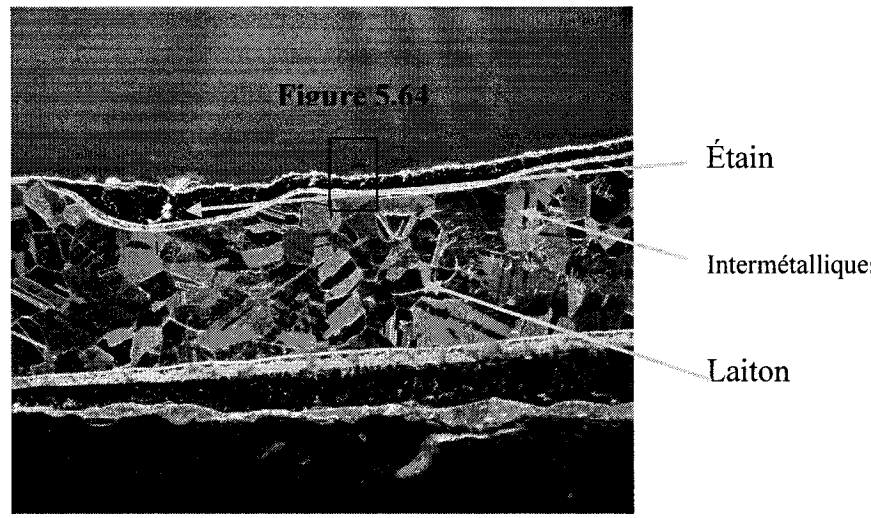


Figure 5.62 : Micrographie révélant une pièce de laiton affectée thermiquement par de l'étain, Experts-Conseils CEP (2004)

Dans certaines circonstances où la température est plus élevée, l'étain en contact avec le laiton peut former des intermétalliques qui fusionneront et ne laisseront pratiquement aucune trace de leur présence en surface, à l'exception des dépressions (figure 5.63).

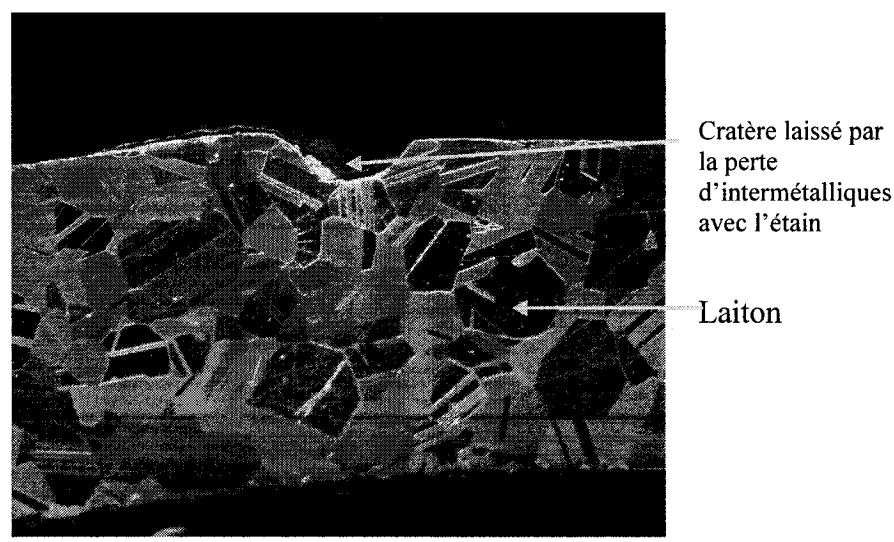


Figure 5.63 : Dépression créée par de l'étain en surface du laiton sans avoir laissé de couche d'étain, Experts-Conseils CEP, 2004

Afin de caractériser l'évolution en l'interaction entre l'étain et le laiton, des analyses linéaires de la variation des éléments comme le cuivre, le zinc, l'étain et l'oxygène ont été réalisées sur les pièces de laiton affectées thermiquement par l'étain (figure 5.64). Les résultats de ces analyses ont démontré qu'il y a eu interactions entre ces métaux, sans toutefois pouvoir noter de tendance particulière (graphique 5.22).

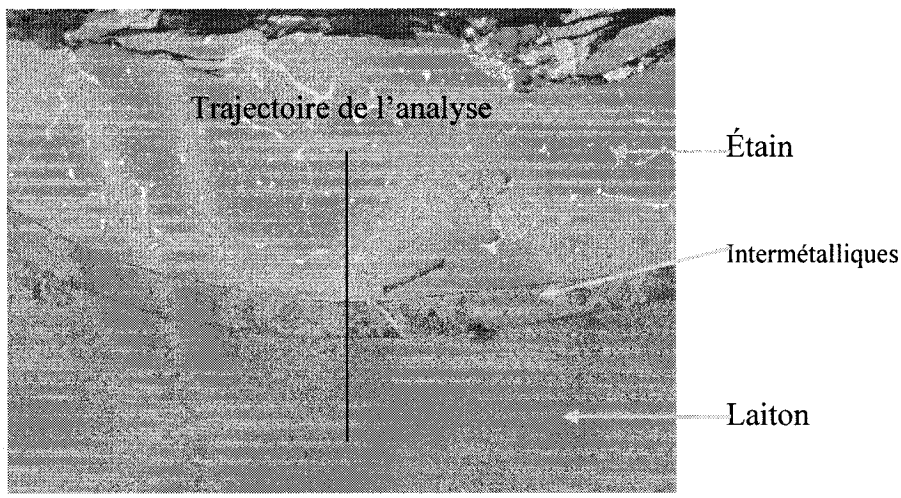
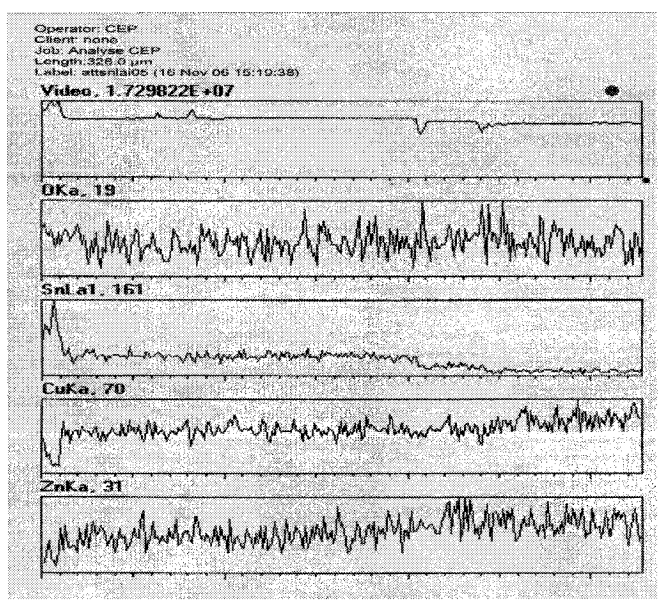


Figure 5.64 : Région d'analyse de 328µm dans la pièce de laiton endommagée thermiquement par de l'étain



Graphique 5.22 : Évolution de ces éléments (Cu,Zn,O,Sn) dans la zone de la trajectoire

Bien qu'il existe une zone physique où il y a des intermétalliques entre le laiton et l'étain, leur évolution ne montre aucune tendance particulière. Cependant, la quantité d'étain diminue au fur et à mesure que nous nous déplaçons dans le laiton. De façon plus précise dans la zone d'interactions (figure 5.65), d'autres analyses ont été réalisées pour confirmer ces résultats (graphique 5.23)

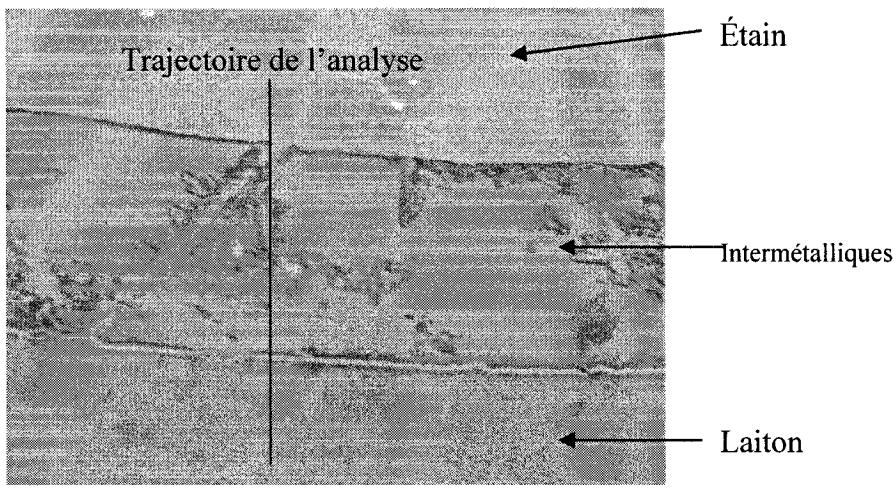
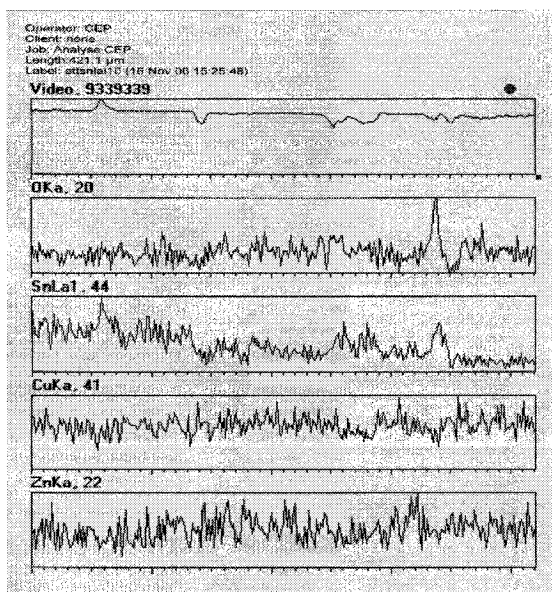


Figure 5.65 : Trajectoire d'analyse dans la pièce de laiton endommagée thermiquement par de l'étain



Graphique 5.23 : Évolution de ces éléments (Cu,Zn,O,Sn) dans la zone de la trajectoire

5.2 Résultats des arcs électriques et courts-circuits

Les diverses pièces présentées dans cette section de mémoire consistent en des conducteurs endommagés par arcs électriques et courts-circuits. Lesdits dommages ont été réalisés en laboratoire ou lors d'un incendie. Il est de mise de noter que les conducteurs présentant des endommagements de nature électrique affectés lors d'un incendie ont été validés par l'examen du système électrique du bâtiment, confirmant objectivement la nature des dommages. Ce qu'il faut retenir du phénomène d'arc électrique et de court-circuit, c'est qu'il implique nécessairement des composants métalliques à des potentiels différents, de sorte qu'il y aura le passage du courant d'une pièce à une autre, laissant ainsi sur lesdites pièces des traces dont nous révélons dans cette section la morphologie et quelques caractéristiques. La caractérisation complète de ces dommages est réalisée, décrite et analysée en détails au chapitre 6.

5.2.1 Courts-circuits sur des conducteurs de cuivre solides (cuivre-cuivre)

Il est primordial de faire un bref retour sur l'exécution de ces essais qui ont impliqué plusieurs paramètres, afin de révéler diverses caractéristiques découlant du phénomène. Ainsi, préalablement à la réalisation de chacun des essais, les échantillons ont été pesés, et ceux-ci ont été pesés de nouveau suite aux essais, afin d'identifier la perte de masse relative à ce phénomène.

Le principe de base était le suivant : l'arc électrique pulvérise sous forme de plasma le métal impliqué au point de contact. Donc, la prise de masse avant et après la réalisation de ces essais de courts-circuits permet de constater si une certaine quantité de métal a été retranchée des conducteurs lors des arcs. Notons que les échantillons étudiés et documentés dans cette section représentent seulement un faible pourcentage de tous ceux faits en laboratoire. Cependant, ils permettent de révéler les caractéristiques

principales et servent de référence. De plus, cette méthode de caractérisation est innovatrice en ce sens qu'elle n'est répertoriée dans aucun manuel et constitue alors un précédent dans l'identification des paramètres de court-circuit.

5.2.1.1 Examens macroscopiques et microscopiques

Suite à la réalisation des courts-circuits sur des conducteurs de cuivre, il est possible de noter et d'identifier, en surface, des régions où le métal présente des dépressions ou des protubérances localisées. En fait, il existe une correspondance quant à la localisation des régions endommagées sur les conducteurs voisins, ce qui conduit à une zone d'intérêt circonscrite entre les conducteurs (figure 5.66). De plus, il existe au moins deux conducteurs affectés par ces endommagements. En surface, les dommages consistent en des dépôts ou des dépressions, lesquels sont relativement brillants. Les surfaces ne sont pas couvertes de produits de combustion. Ceci est dû à la température locale très élevée.

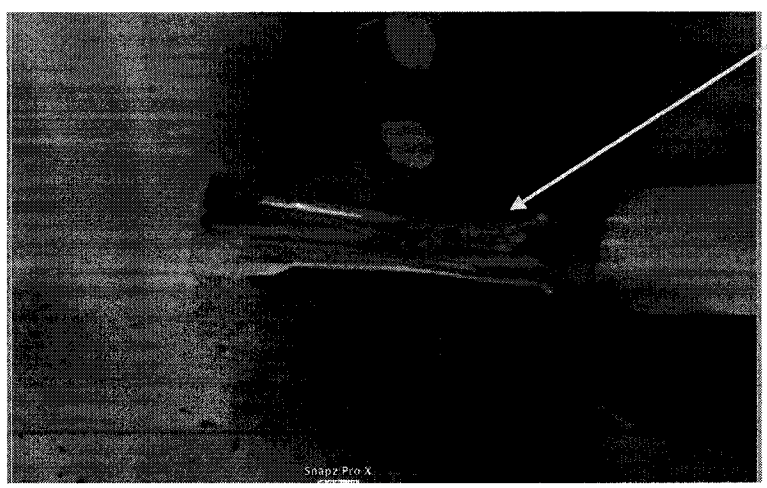
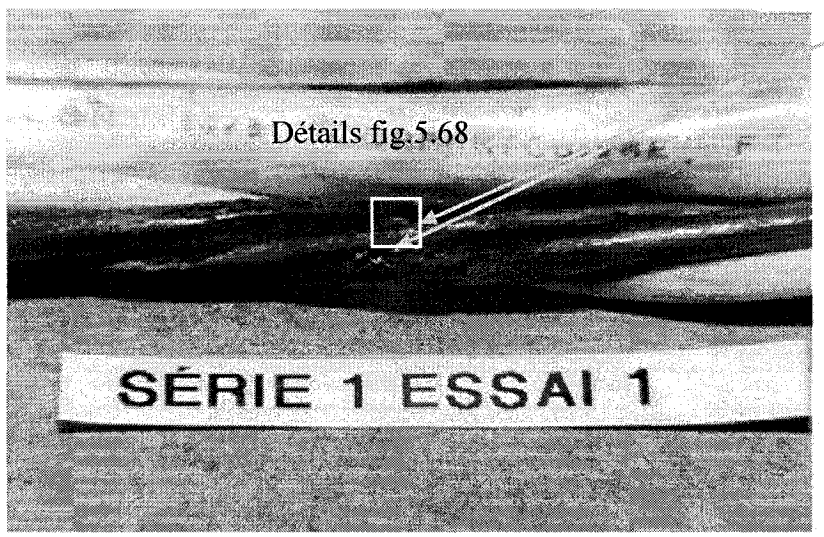


Figure 5.66 : Endommagement par court-circuit entre des conducteurs de cuivre faits en laboratoire, Experts-Conseils CEP (2005)

Ainsi, il y a nécessairement au moins deux éléments affectés par arc électrique ou par court-circuit. De plus, la région endommagée est circonscrite et localisée, de sorte que le reste de la surface du conducteur de cuivre porte encore les marques laissées par la mise en forme. Cette région peut être caractérisée par une morphologie s'apparentant à une dépression ou un dépôt sur le conducteur (figures 5.67 et 5.68).



Dommages faits par court-circuit

Figure 5.67 : Dommages ponctuels et localisés laissés par un court-circuit sur un câble de cuivre solide

Lignes laissées par la mise en forme

Globule découlant du court-circuit

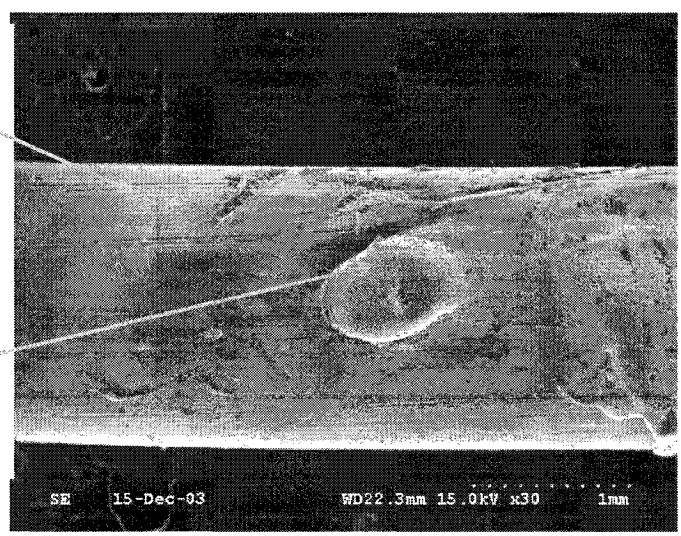


Figure 5.68 : Dommage ponctuel sur un conducteur de cuivre résultant d'un court-circuit

Il ressort des figures 5.67 et 5.68 précédentes que les zones caractérisées par des traces laissées par des courts-circuits sont claires, limitées et ponctuelles. Elles ne s'étendent pas en surface mais demeurent plutôt circonscrites. Le fini et la texture de la surface demeurent relativement lisses et il n'y a pratiquement pas d'oxydes sur les zones endommagées. En addition aux dommages précités, il est fréquent d'identifier des endommagements ponctuels, circulaires ou sphériques, qui peuvent se retrouver en surface ou aux extrémités sectionnées des conducteurs (figure 5.69). En fait, il n'est pas rare de constater que certains conducteurs de cuivre ont subi un sectionnement complet par court-circuit. Cependant, contrairement aux caractéristiques des sectionnements par la chaleur, celles résultant des arcs électriques laissent des globules sphériques aux extrémités et non le long des conducteurs allongés et amincis.

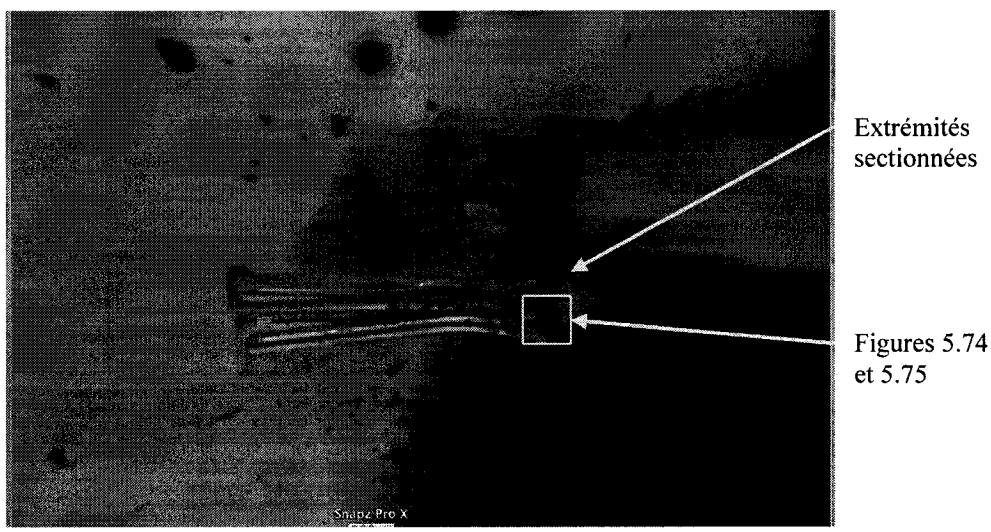


Figure 5.69 : Sectionnement par court-circuit fait en laboratoire sur un câble de cuivre, Experts-Conseils CEP (2005)

Ainsi, par opposition aux dommages purement thermiques présentés à la section 5.1 précédente, les endommagements par arcs électriques ou court-circuit ayant engendrés le sectionnement des conducteurs ont formé des formes circulaires aux extrémités, et aucun amincissement du diamètre. Il n'y a également pas eu d'influence,

sur la forme, liée à la gravité. Dans le cas où il y a sectionnement des conducteurs, les pertes de métal associées à ces endommagements sont plus importantes que celles liées à l'affectation localisée de conducteurs.

Sur des scènes d'incendie, il est fréquent d'identifier des conducteurs portant des traces en surfaces similaires à celles précitées, lesquelles sont attribuables à une activité électrique. En fait, l'examen des composants électriques peut révéler des endommagements localisés et ponctuels, dont la morphologie des zones affectées est arrondie (figures 5.70 et 5.71). De plus, ces dommages affectent nécessairement au moins deux conducteurs ou composants métalliques. Quant aux restes de la surface des conducteurs, elle ne montre aucun amincissement ou détérioration et porte encore les marques laissées pas sa mise en forme. Seule la coloration peut avoir changé puisqu'il peut y avoir croissance des oxydes de cuivre en surface, mais ce phénomène est très localisé . De plus, il est même possible que la gaine du câble soit encore présente sur des sections éloignées des traces de court-circuit.

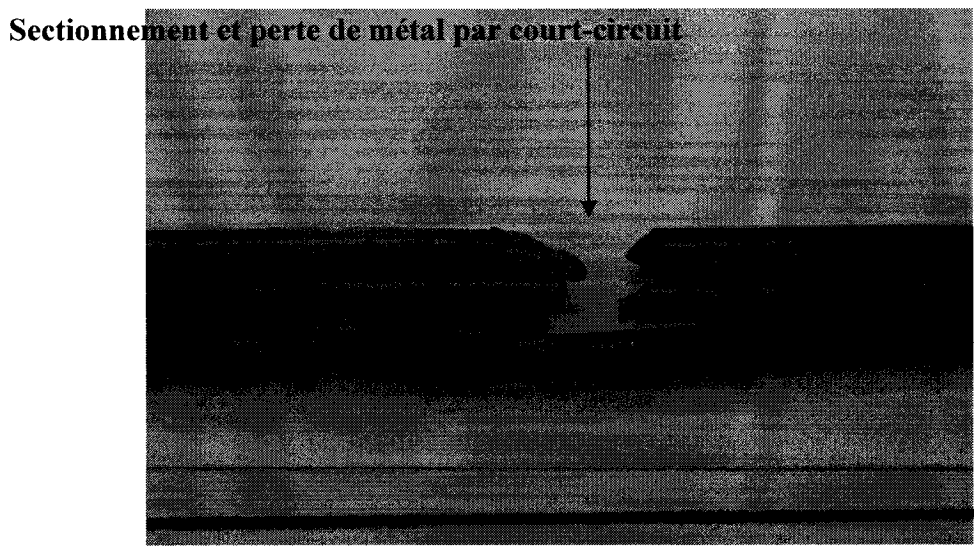


Figure 5.70 : Sectionnement de deux conducteurs de cuivre suite à un court-circuit, échantillon prélevé sur une scène d'incendie (40X)

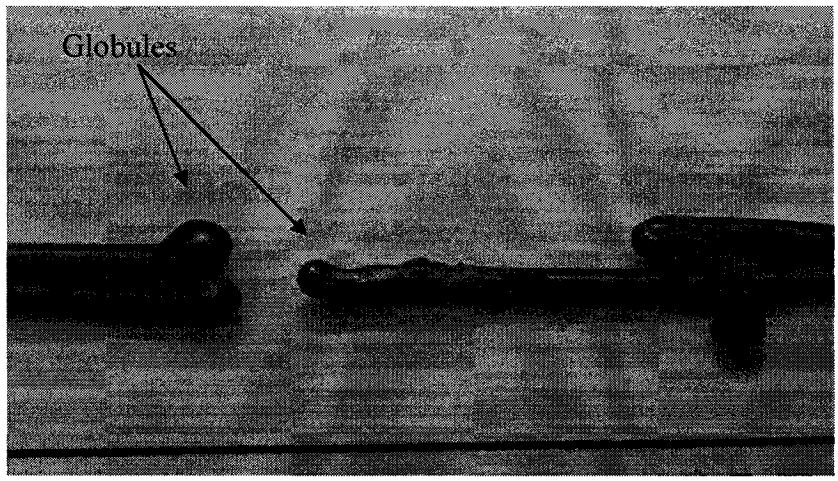


Figure 5.71 : Globules sur des conducteurs de cuivre occasionnés par un court-circuit, échantillon prélevé sur une scène d'incendie (40X)

À plus fort grossissement, l'examen des régions affectées par court-circuit démontre que le métal (cuivre) s'est liquéfié au point de contact entre les deux conducteurs et a engendré une région liquide autour de celui-ci. Ainsi, l'énergie du court-circuit a entraîné la fusion du métal, lequel a été pulvérisé et s'est même volatilisé sous forme de plasma avant de se solidifier rapidement sur la surface du reste des conducteurs, par la suite. Cette solidification rapide a été accélérée par les différences de températures notables entre le métal liquide, celui sous forme de plasma généré par l'arc électrique (plus de 8000°C) et le cuivre solide en surface du conducteur, laissant alors en surface des indications précises et typiques de traces de court-circuit.

Ainsi, seuls les dommages résultant des courts-circuits engendrent des zones caractérisées par des vagues de solidification, lesquelles sont mises en évidence aux figures 5.72 et 5.73. La surface des conducteurs de cuivre est alors lisse et ne présente que peu d'oxydes, lesquels ne cachent donc pas les signes en surface.

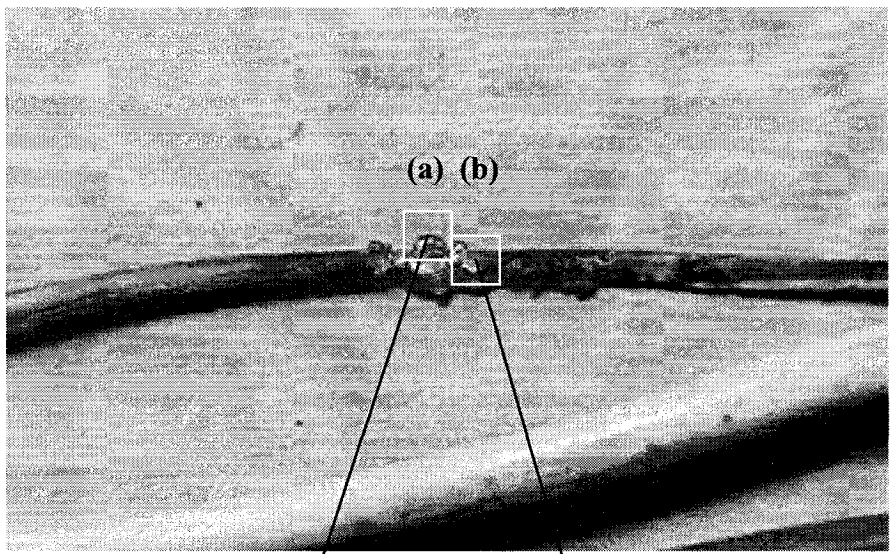
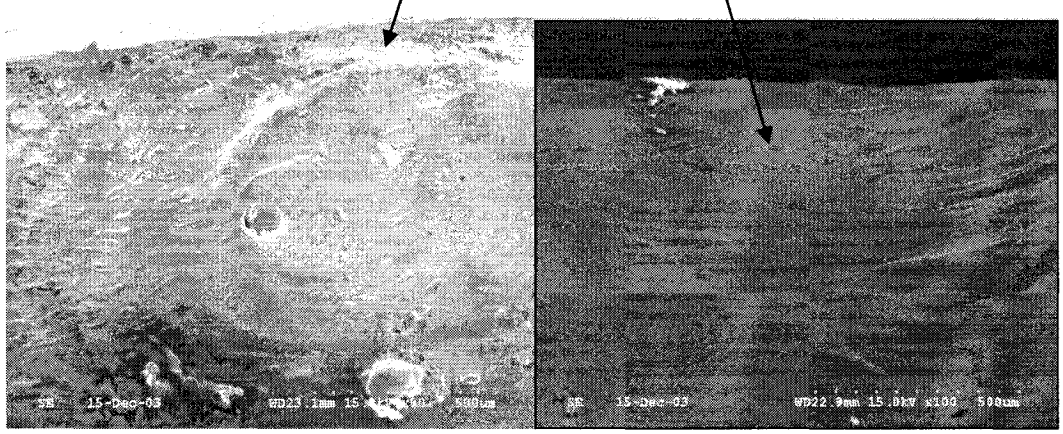


Figure 5.72 : Endommagement généré par un court-circuit sur un conducteur de cuivre



(a) (b)

Figure 5.73 : Vagues de solidification en surface d'un conducteur de cuivre endommagé par court-circuit (a) sur un amoncellement et (b) dans une dépression

De plus, toutes les régions caractérisées par les endommagements de nature électrique présentaient des caractéristiques, révélées à fort grossissement, très différentes de celles notées pour les dommages de nature purement thermique. En effet, autant la morphologie des endommagements que les surfaces présentent une

topographie distincte. Les zones endommagées sont ponctuelles et bien limitées. Elles sont caractérisées par des formes arrondies et un fini très lisse, comme montré aux figures 5.74 et 5.75. De plus, les porosités sont sphériques et les dommages ponctuels révèlent encore une fois des vagues laissées par la solidification du cuivre sur le conducteur.

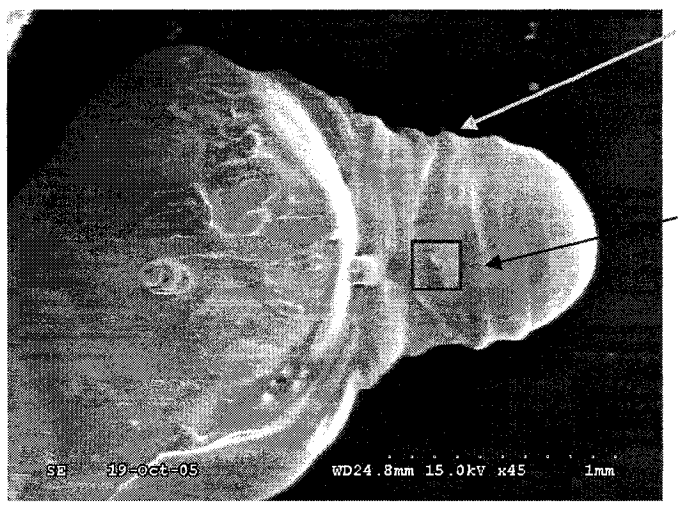


Figure 5.74 : Extrémité sectionnée par court-circuit d'un conducteur de cuivre montrant des vagues de solidification

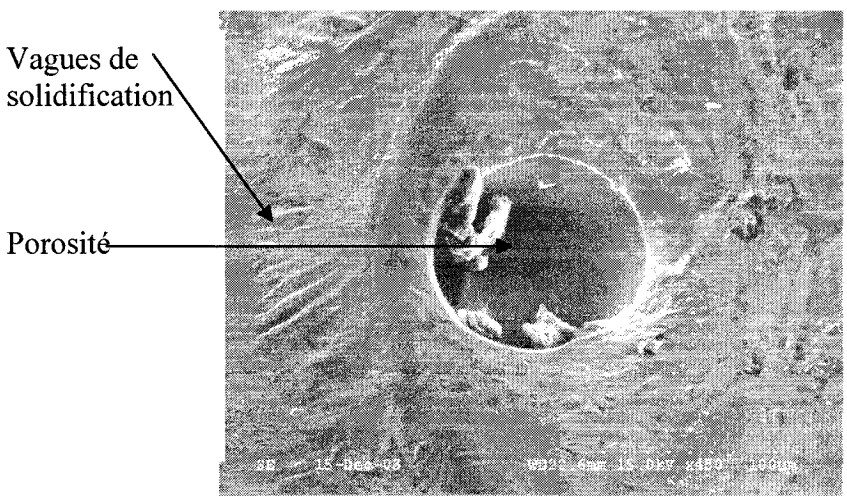


Figure 5.75 : Surface lisse avec vagues de solidification et porosités sur la zone endommagée laissée par le court-circuit

Ainsi, il ressort de l'examen des figures précédentes que les caractéristiques suivantes sont détectées seulement dans le cas des dommages de nature électrique : surfaces lisses, la présence de petites porosités, les zones ponctuelles et définies d'endommagement, les lignes et vagues de solidification ainsi que la propagation à partir du point de contact de l'arc électrique.

Contrairement aux dommages résultant d'un apport extérieur de température, ceux liés aux courts-circuits ne laissent pas les surfaces couvertes d'oxydes bien que les températures au point de contact et générées par l'arc électrique soient plus élevées que celles impliquées dans les dommages thermiques. En fait, ce phénomène se produit tellement rapidement qu'il ne laisse pas le temps aux oxydes de croître en surface. C'est la raison pour laquelle nous ne retrouvons aucune structure particulière de la croissance des oxydes en surface dont notamment aucune structure dendritique. De plus, il est documenté que les gaz dans l'arc électrique ont des pressions également élevées, ne favorisant donc pas la croissance importante d'oxydes en surface.

5.2.1.2 Analyses de composition chimique par EDS et microstructures des sections

Dans le cas d'un court-circuit, les analyses de composition en surface du conducteur et incluant la zone endommagée (figure 5.76) révèlent les éléments constituant ledit métal, ainsi que l'oxygène, le carbone et quelques contaminants, comme montré au graphique 5.24 suivant. Il n'y a donc aucune information particulière à tirer quant aux métaux en présence lors des courts-circuits n'impliquant que des conducteurs de cuivre. En fait, comme ce type de court-circuit implique deux conducteurs de cuivre, ceux-ci se touchent et réagissent. Le métal qui se liquéfie au point de contact est donc constitué de cuivre, d'où la présence de cet élément. Quant aux contaminants, ils proviennent principalement du milieu d'incendie et de l'eau de l'arrosage des pompiers.

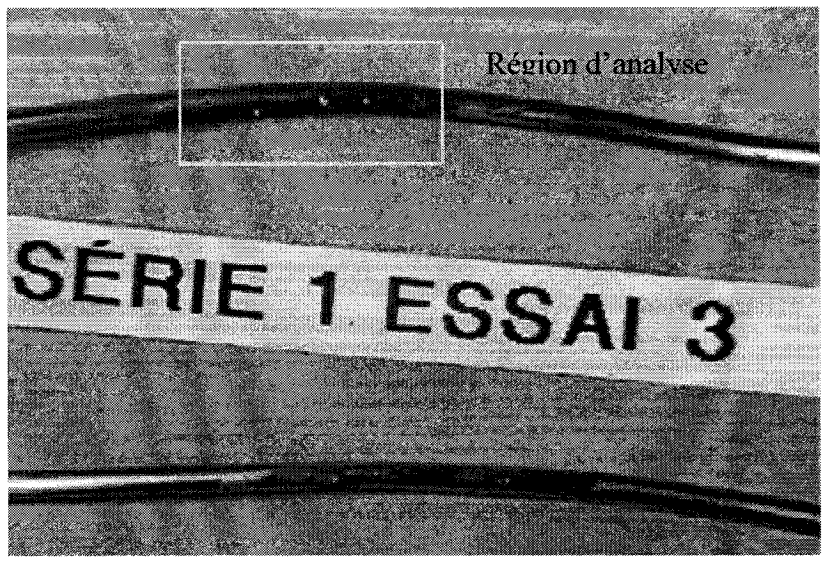
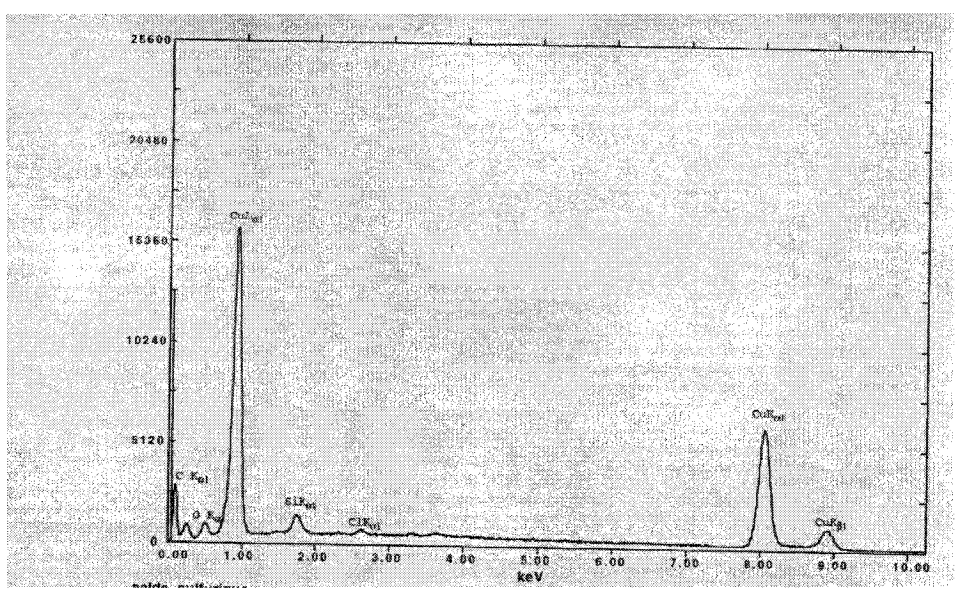


Figure 5.76 : Région d'analyse de composition sur conducteur de cuivre portant un endommagement par court-circuit



Graphique 5.24 : Analyse de la surface d'un dommage par court-circuit sur un conducteur de cuivre

Il est intéressant de noter l'impact, sur la microstructure d'un conducteur de cuivre, d'un endommagement par court-circuit. Celui-ci crée une déformation localisée des grains du conducteur au point de contact où l'arc s'est amorcé (figures 5.77 et 5.78), ce qui n'était pas le cas lors des dommages thermiques. De fait, seuls les grains à proximité de la zone caractérisée par la trace de court-circuit ont été affectés par ce phénomène, alors que le reste du conducteur présente une microstructure uniforme.

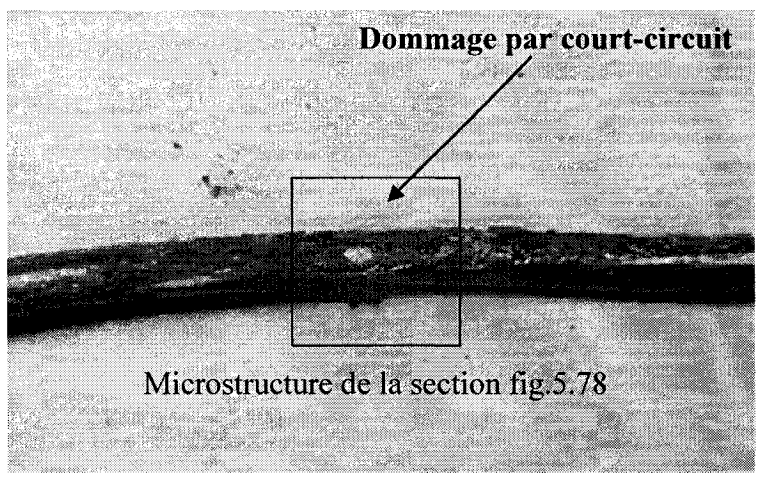


Figure 5.77 : Endommagement par court-circuit sur un conducteur de cuivre

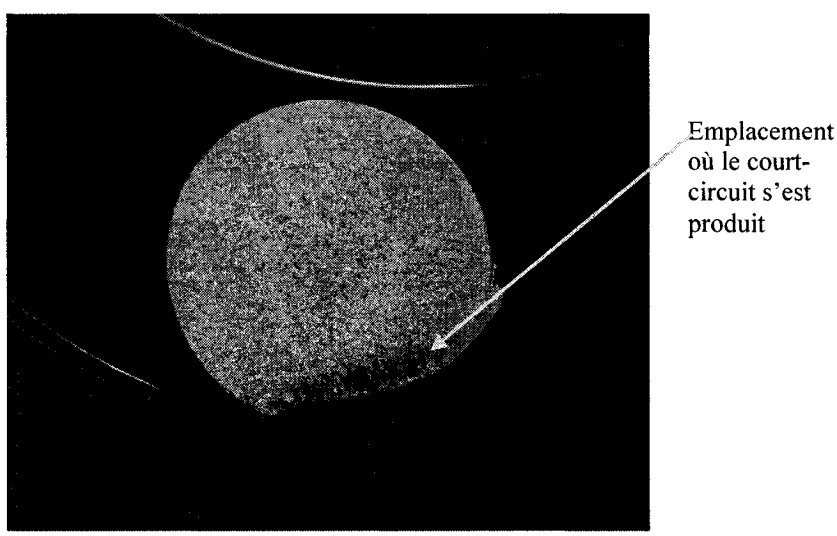


Figure 5.78 : Microstructure de la section endommagée par court-circuit sur un conducteur de cuivre

Seul un endommagement par court-circuit affecte la microstructure localement à un point tel que les grains s'en trouvent déformés. En fait, le plasma généré par le court-circuit engendre le mouvement rapide de l'interface de cuivre en fusion sur un conducteur solide et son refroidissement tout aussi rapide, d'où la distinction claire entre la zone affectée par le court-circuit et le reste de la microstructure du conducteur.

La caractérisation de l'évolution du cuivre et de l'oxygène dans la zone affectée par le court-circuit a été réalisée par le biais d'une analyse de la composition de la surface le long de la trajectoire indiquée sur la figure 5.80. En fait, c'est une surface d'un conducteur de cuivre présentant un globule et une dépression faits lors d'un court-circuit qui a servi de repère pour cette analyse.

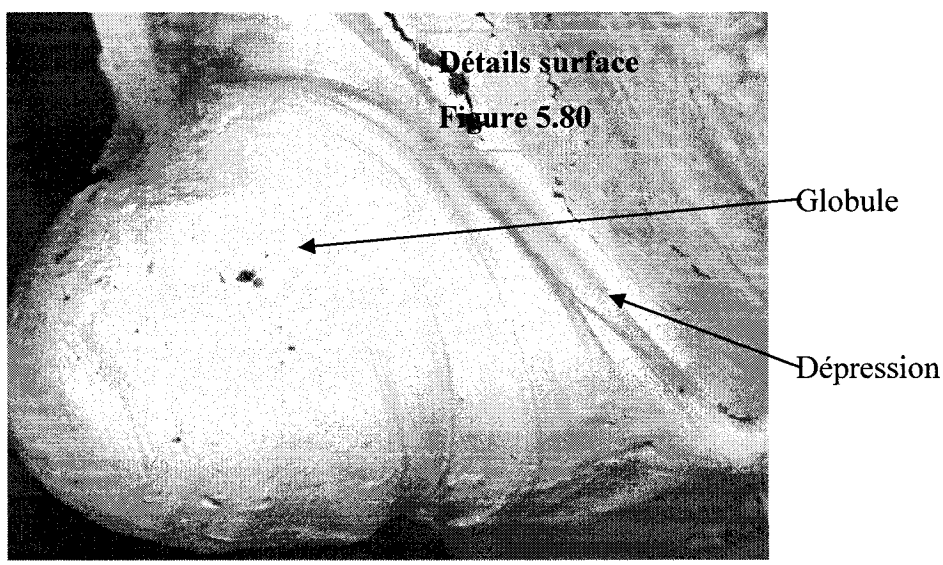


Figure 5.79 : Globule et dépression occasionnés par un court-circuit sur un conducteur de cuivre (100X)

Ainsi, les résultats des ces analyses de composition linéaire effectuées selon la zone identifiée à la figure 5.80 ont démontré qu'il n'y avait aucune tendance entre l'oxygène et le cuivre pour la formation d'oxydes particuliers (graphique 5.25).

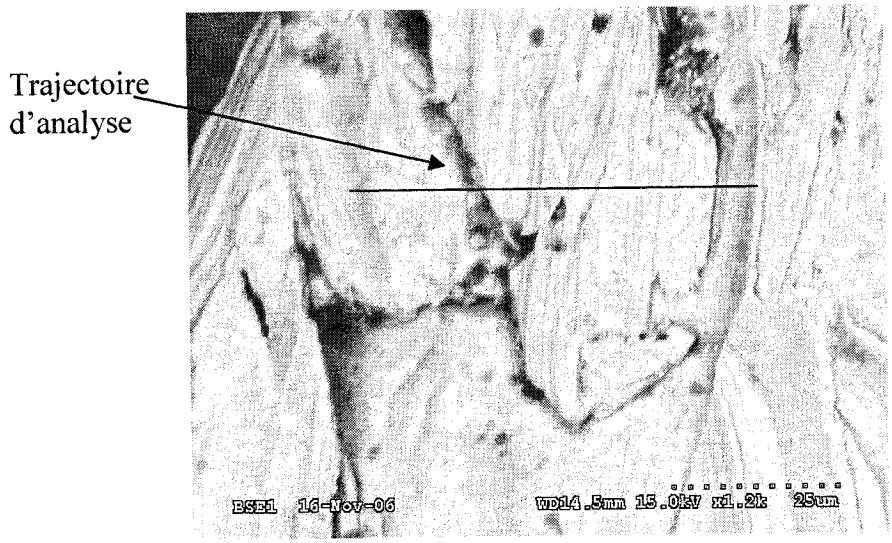
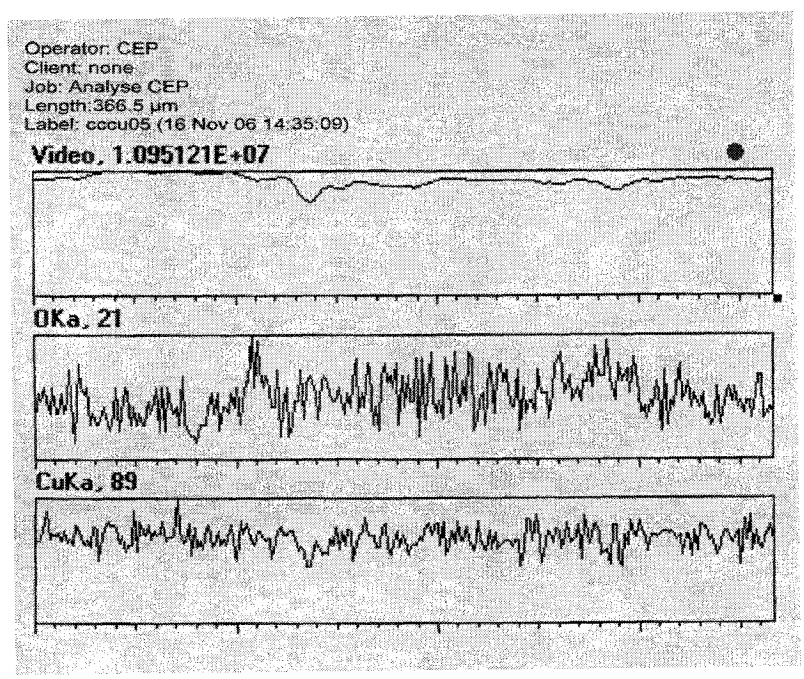


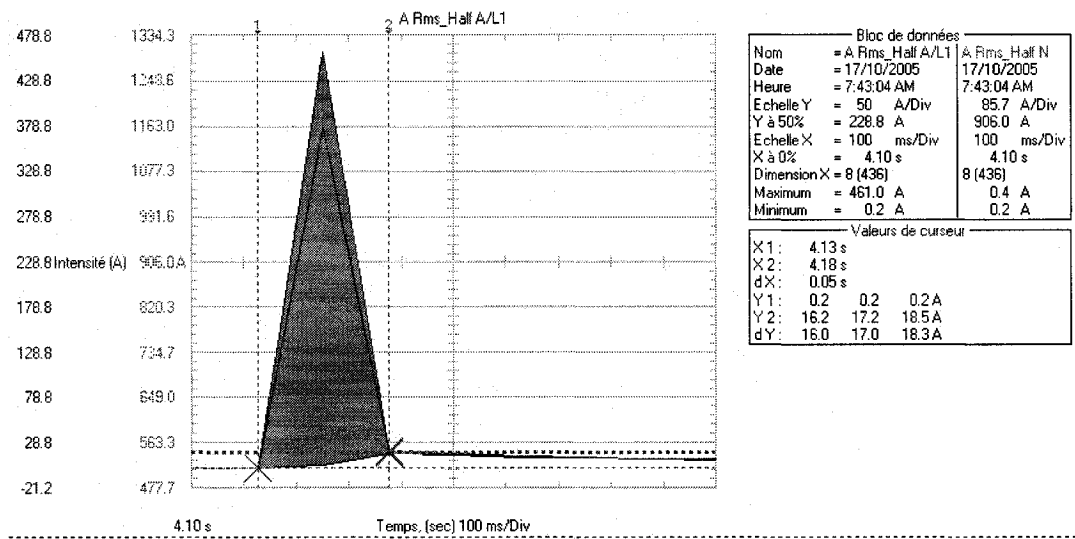
Figure 5.80 : Région d'analyse dans un conducteur de cuivre endommagée par court-circuit



Graphique 5.25 : Évolution du cuivre et de l'oxygène dans la zone d'analyse

5.2.1.3 Énergie et paramètres électriques associés aux courts-circuits

Comme il a été mentionné précédemment, les paramètres comme le courant et le voltage ont été mesurés lors de la réalisation des essais de courts-circuits et d'arcs électriques en laboratoire afin de caractériser les fluctuations et le comportement desdits paramètres lors d'un court-circuit. Ces données ont été traduites par une courbe importée grâce au logiciel FLUKEVIEW accompagnant l'appareil d'acquisition de données. Le graphique 5.26 montrent un résultat typique de la variation de l'intensité du courant en fonction du temps, obtenu pour une tension de 120 volts.



Court-circuit 1 : 120 Volts, nmd90 14/2, perte masse=0,01g, E = 1383J

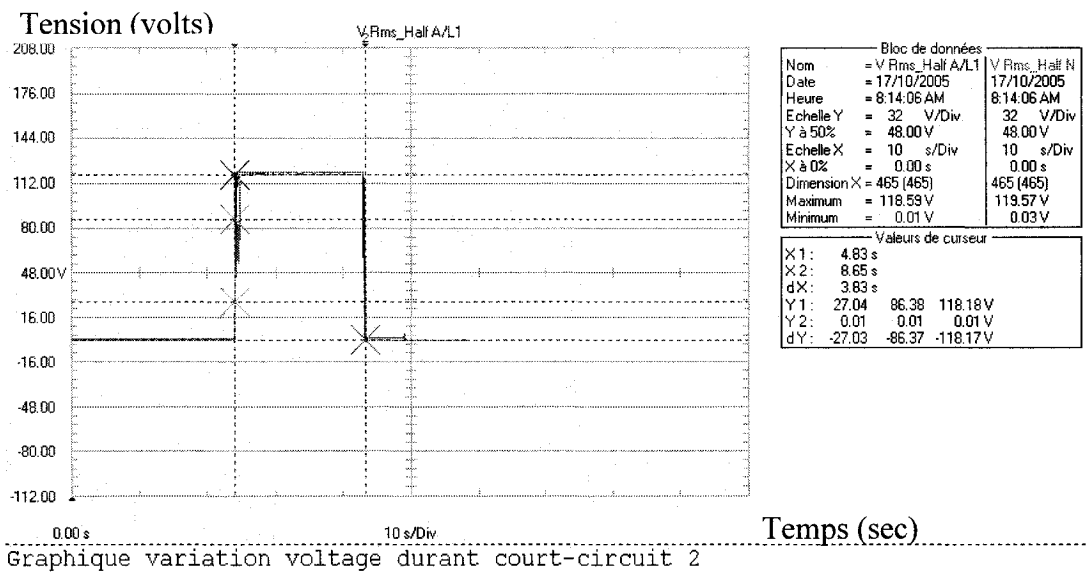
<u>Intensité maximale : 451,0 Ampères</u>

Graphique 5.26 : Intensité du courant de court-circuit en fonction du temps pour un conducteur de cuivre à 120 volts, de calibre 14 AWG

Notons que l'énergie du court-circuit dont la courbe est représentée au graphique 5.26 a été calculée en effectuant l'aire sous la courbe pour un temps total de court-circuit de 0,05 seconde. Ce court-circuit occasionné sur un conducteur de cuivre de

calibre 14AWG a donc généré 1383 Joules. Cette énergie s'est traduite par la fusion du cuivre aux points de contacts des deux conducteurs de cuivre, engendrant alors une certaine pulvérisation du métal sous forme de plasma, le tout découlant de l'arc électrique. Ainsi, ce phénomène a contribué à une perte de masse des conducteurs du câble de 0,01 gramme.

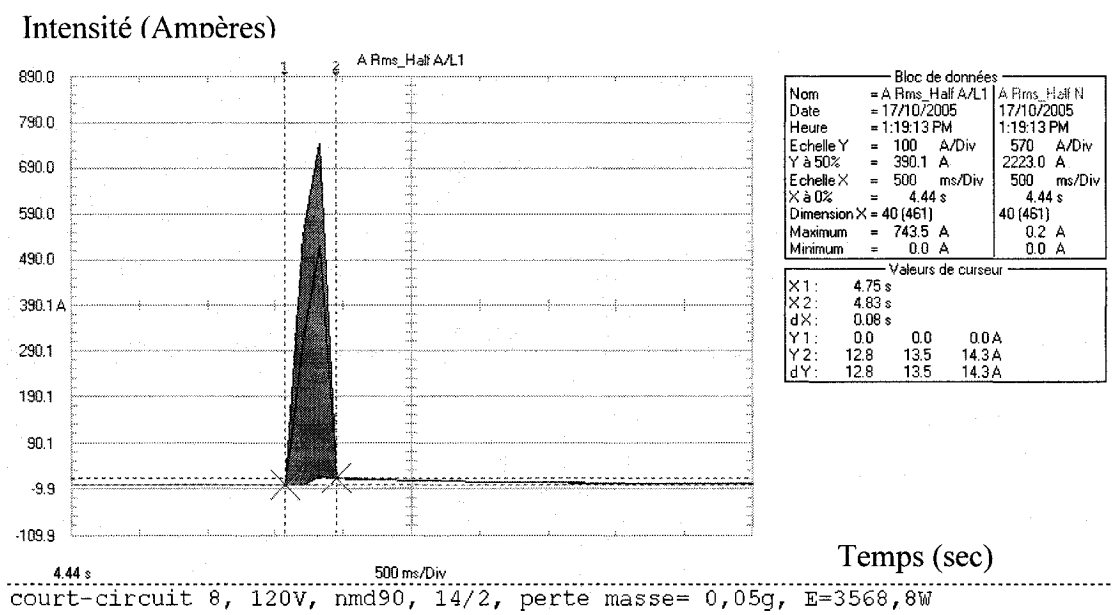
Quant à l'évolution de la tension lors de ce court-circuit, sa variation dans le temps est présentée au graphique 5.27. En fait, nous notons dans ce cas, comme dans tous les autres essais, que la tension est demeurée pratiquement constante lors du phénomène de court-circuit. Ainsi, la variation de la tension n'apporte aucune précision ni données particulières sur l'évolution d'un court-circuit. Elle est d'ailleurs uniquement utilisée comme constante pour calculer l'énergie de court-circuit.



Graphique 5.27 : Variation du voltage en fonction du temps lors d'un court-circuit sur un câble de cuivre de calibre 14 AWG, Experts-Conseils CEP, 2005

Nonobstant la stabilité du voltage pour tous les essais de court-circuit, les valeurs des intensités et des pertes de masse ont, quant à elles, varié de façon

significative lors de la réalisation d'essais dont les paramètres initiaux étaient les mêmes. De façon générale, les morphologies des courbes de la variation de l'intensité en fonction du temps pouvaient différer, donnant ainsi lieu à des hauteurs de pics et des largeurs de base diverses. Ces deux caractéristiques des graphiques indiquaient une certaine variation possible quant à l'intensité maximale et le temps de durée d'un court-circuit. De fait, les calculs des énergies de courts-circuits réalisés à partir des données des graphiques révélaient des résultats variant d'un essai à un autre. Le graphique 5.28 montre une courbe de variation de l'intensité en fonction du temps, dont le calcul de l'énergie de court-circuit a démontré une valeur de 3568.8 Joules. Cette valeur d'énergie a cependant été calculée pour un essais dont les paramètres initiaux étaient les mêmes que ceux du graphique 5.26, soit à 120 volts, pour un conducteur de cuivre de calibre 14 AWG.



court-circuit 8, 120V, nmd90, 14/2, perte masse= 0,05g, E=3568,8W

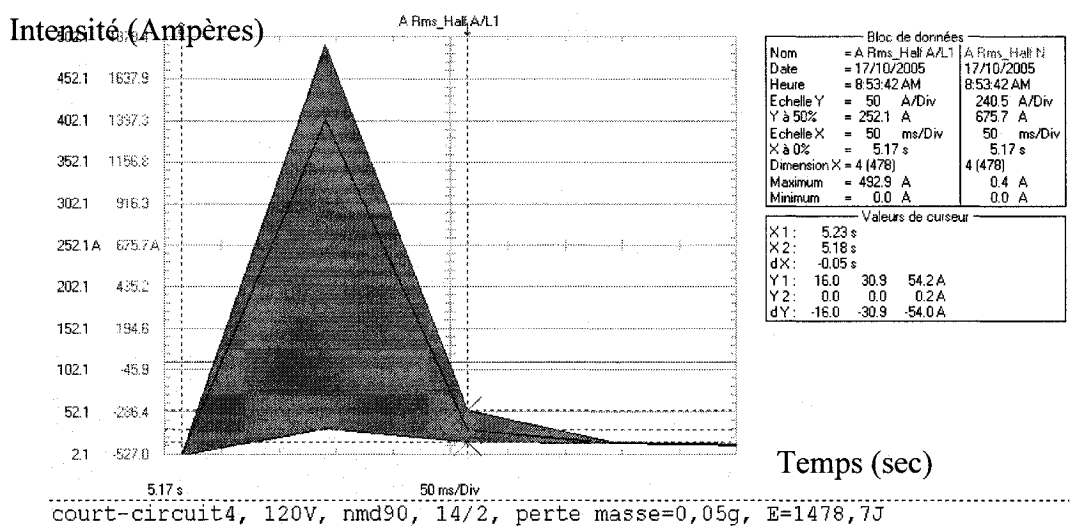
Intensité maximale : 743,5 Ampères

Graphique 5.28 : Variation de l'intensité du courant en fonction du temps lors d'un court-circuit à 120 volts pour un câble de cuivre 14AWG, 2005

Dans le cas de la courbe de la variation de l'intensité en fonction du temps présentée au graphique 5.28 précédent, l'intensité maximale du courant a atteint une

valeur supérieure à 700 Ampères en un temps de 0,08 seconde, d'où l'énergie ainsi calculée trois fois plus élevée que dans le cas de l'essais dont la courbe a été présentée à la figure 5.26.

En ce qui concerne les variations de perte de masse, elles sont également notées dans le cas d'essais similaires impliquant les mêmes conditions de base. Le phénomène menant à ce constat est attribuable au fait que l'arc électrique est un phénomène particulier impliquant un certain chemin conducteur unique entre les deux brins des conducteurs de cuivre. Il s'ensuit une quantité particulière de métal en fusion impliquée au point de contact, d'où une pulvérisation particulière et distincte pour chacun des essais de court-circuit. Par conséquent, la masse vaporisée de métal devient une variable supplémentaire. Le graphique 5.29 montre une courbe de l'évolution de l'intensité du courant en fonction du temps ayant entraîné la perte de 0,05 gramme de cuivre, malgré la faiblesse de l'énergie du court-circuit.

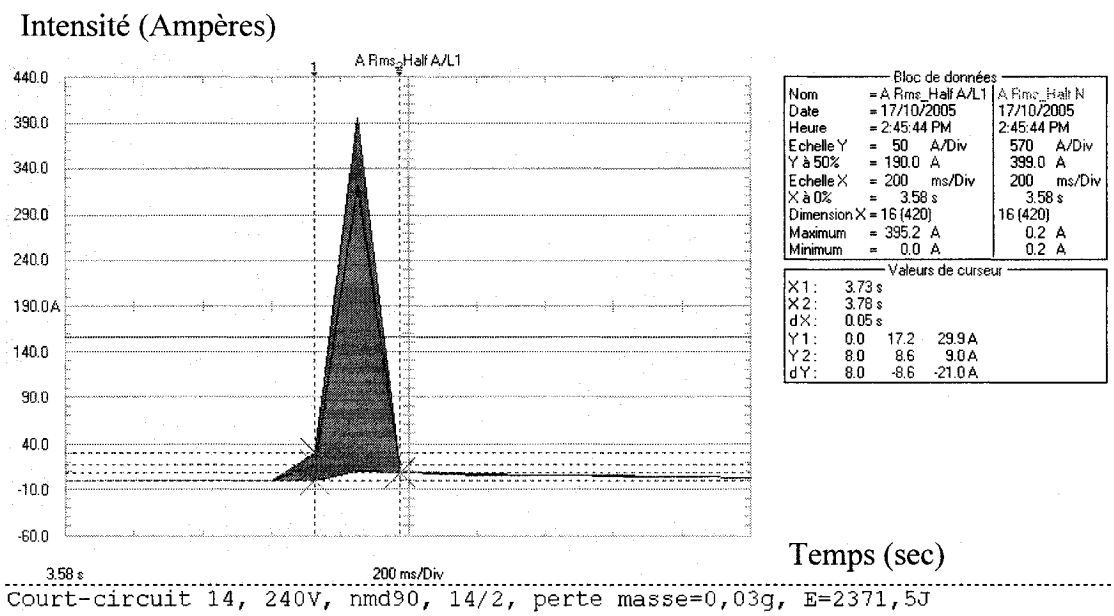


Intensité maximale : 492,9 Ampères

Graphique 5.29 : Variation de l'intensité du courant en fonction du temps lors d'un court-circuit à 120 volts pour un câble de cuivre 14 AWG, 2005

Ainsi, la courbe représentant la variation de l'intensité du courant en fonction du temps est unique et dévoile des résultats propres à chacun des essais. Nous avons fait

varier les paramètres de base des essais afin de caractériser leur influence sur les intensités des courts-circuits et les énergies ainsi calculées. Ainsi, en augmentant la tension à 240 volts pour un conducteur du même calibre, soit de 14 AWG, les intensités et les énergies correspondantes pouvaient être calculées afin de noter la présence ou l'absence de tendance et de lien entre ces paramètres initiaux. Le graphique 5.30 montre les résultats obtenus pour un câble de calibre 14 AWG alimenté à 240 volts lors d'un court-circuit. Les résultats de ces essais dévoilent une intensité maximale de 395,2 Ampères, un temps de court-circuit de 0,05 seconde et une énergie calculée de 2371,5 Joules pour une perte de masse totale de 0,03 gramme .



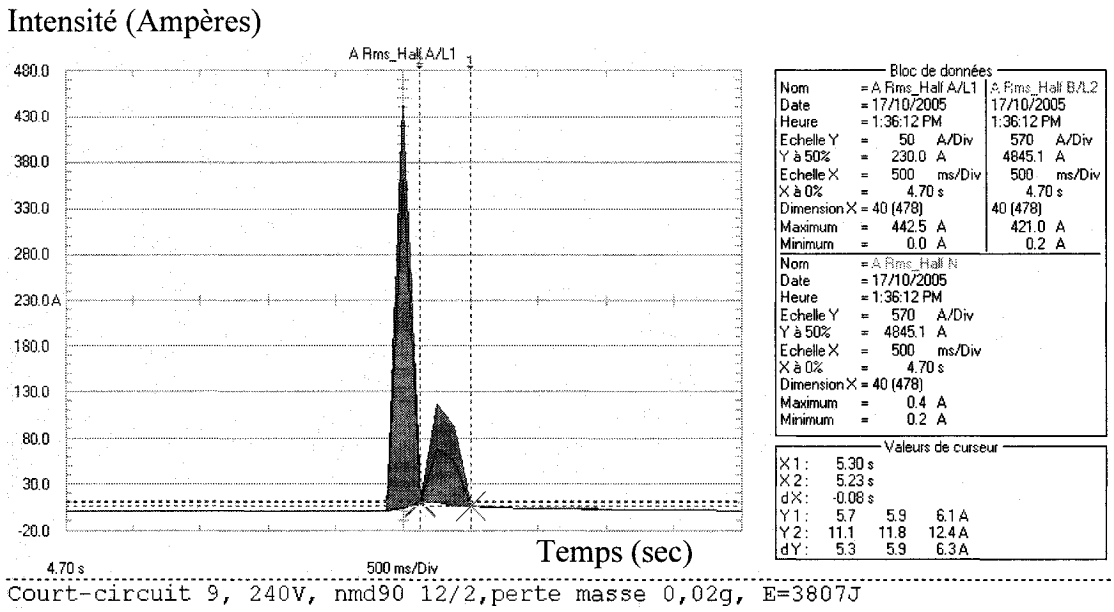
Court-circuit 14, 240V, nmd90, 14/2, perte masse=0,03g, E=2371,5J

Intensité maximale : 395,2 Ampères

Graphique 5.30 : Variation de l'intensité du courant en fonction du temps lors d'un court-circuit à 240 volts pour un câble de cuivre 14 AWG, 2005

En plus de la variation du voltage, d'autres essais à 240 volts ont été réalisés sur des conducteurs de calibre supérieur, soit de 12 AWG, afin de noter l'influencce de la variation de ce paramètre sur les résultats des essais. Le graphique 5.31 illustre la courbe de la variation de l'intensité du courant de court-circuit en fonction du temps,

pour un câble de cuivre de calibre 12 AWG à 240 volts. Les résultats ainsi obtenus ont révélé des valeurs d'énergie de 3807 Joules et une perte de masse de 0,02 gramme.



Intensité maximale : 442,5 Ampères

Graphique 5.31 : Variation de l'intensité d'un court-circuit d'un court-circuit en fonction du temps, pour un essai à 240 volts, Experts,Conseils CEP, 2005

De façon générale, les énergies associées aux courts-circuits réalisés à 240 volts révélaient des valeurs légèrement plus élevées que pour les essais à 120 volts, ce qui est normal puisque le calcul de l'énergie considère la tension qui se trouve à être justement plus importante. Cependant, les intensités de courant de court-circuit demeuraient sensiblement les mêmes, tout comme pour la durée du court-circuit. Le tableau 5.1 dévoile les résultats de plusieurs essais de courts-circuits tout en considérant la variation des divers paramètres. Mentionnons que la forme des graphiques dont notamment la présence de deux pics s'explique par le fait qu'il peut y avoir plus d'une région ponctuelle de contact lors des essais de court-circuit, ainsi que la création d'une zone de contact additionnelle lors de la projection de métal en fusion sur les conducteurs adjacents.

Tableau 5.1 : Paramètres et résultats des essais de court-circuit sur des conducteurs de cuivre, Experts-Conseils CEP (2005)

Essais #	Calibre du câble	Tension (Volts)	Intensité maximale (Ampères)	Temps (sec)	Énergie (Joules)	Perte de masse (g)
1	14AWG	120	461	0,05	1383	0,01
2	14AWG	120	283,2	0,07	1869,12	0,01
3	14AWG	120	464,4	0,05	1393,2	0,03
4	14AWG	120	492,9	0,05	1478,7	0,05
5	14AWG	120	411	0,08	1972,8	0,03
6	14AWG	120	513,8	0,05	1541,1	0,05
7	14AWG	120	421	0,10	4814,88	0,07
8	14AWG	120	743,5	0,08	3568,8	0,05
9	12AWG	240	442,5	0,12	3807	0,02
10	12AWG	240	591,7	0,08	5680,32	0,03
11	12AWG	240	495	0,08	4752	0,03
12	12AWG	240	505,1	0,05	3030,6	0,04
13	12AWG	240	328,4	0,07	2758,56	0,01
14	14AWG	240	395,2	0,05	2371,5	0,03
15	12AWG	240	478,2	0,05	2869,2	0,03
16	14AWG	240	440,6	0,07	5225,28	1,35
17	14AWG	240	615,1	0,08	5904,96	0,1
18	14AWG	120	408,2	0,08	4898,4	0,02
19	12AWG	120	364,5	0,09	2187	0,01
20	12AWG	120	385,7	0,05	1157,1	0,02

5.2.2 Courts-circuits cuivre multibrins

Les phénomènes d'arc électrique et de court-circuit se produisent de façon similaire sur des conducteurs de cuivre solides ou des conducteurs multibrins. En fait, les paramètres qui peuvent varier sont notamment le calibre des conducteurs, l'étendue du dommage et le nombre de brins affectés par le phénomène. Ceci s'explique par le fait que tous les brins d'un conducteur multibrins sont au même potentiel, et lorsque ceux-ci touchent à un second conducteur multibrins caractérisé par un potentiel différent, il est possible que seuls quelques brins d'un conducteur réagissent avec quelques brins de l'autre. Ainsi, le nombre de brins réagissant est aléatoire et dépend des brins impliqués au point de contact où se produit l'arc électrique.

5.2.2.1 Examens macroscopiques et microscopiques

De façon générale, les endommagements engendrés par des courts-circuits sur des conducteurs multibrins comportent sensiblement les mêmes caractéristiques que celles énumérées à la section 5.2.1 pour les conducteurs de cuivre solides, à l'exception de la taille des dommages. En fait, les globules résultants d'arcs électriques sur des conducteurs multibrins peuvent avoir une taille inférieure à ceux identifiés sur des conducteurs solides puisque le nombre de brins impliqués peut être faible, limitant alors la quantité de métal en fusion. Par conséquent, il est possible de noter des globules et un endommagement localisé sur seulement quelques brins d'un conducteur multibrins (figure 5.81). Ceux-ci ont donc une taille très faible, ce qui complique l'identification macroscopique de ce type d'endommagement.

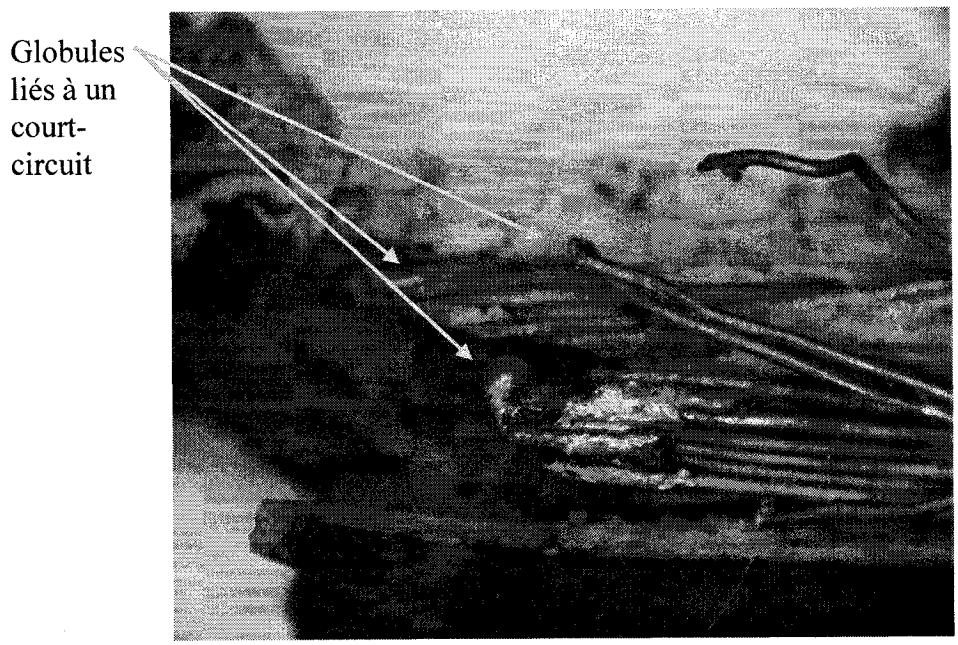


Figure 5.81 : Conducteurs multibrins de cuivre affectés par court-circuit et montrant des globules, échantillon prélevé sur un incendie

Les endommagements par court-circuit sont caractérisés par la présence de globules aux formes arrondies, d'extrémités sphériques limitées et circonscrites sur les brins et l'affectation localisée des brins. En effet, il n'y a pas de dommages qui s'étendent longuement en surface, mais ceux-ci demeurent plutôt limités. Le sectionnement des brins se traduit par la présence de globules et non d'une masse allongée et rétrécissant tout en montrant un amincissement et des arêtes vives. Pareillement aux traces laissées par les courts-circuits sur les conducteurs de cuivre solides, celles observées sur les conducteurs multibrins peuvent entraîner le sectionnement du conducteur ou simplement un endommagement localisé au point de contact où s'est produit l'arc électrique (figures 5.82 et 5.83). Les endommagements laissent des surfaces lisses sans formation importante d'oxydes oblitérant la zone endommagée, et impliquent nécessairement au moins deux conducteurs.

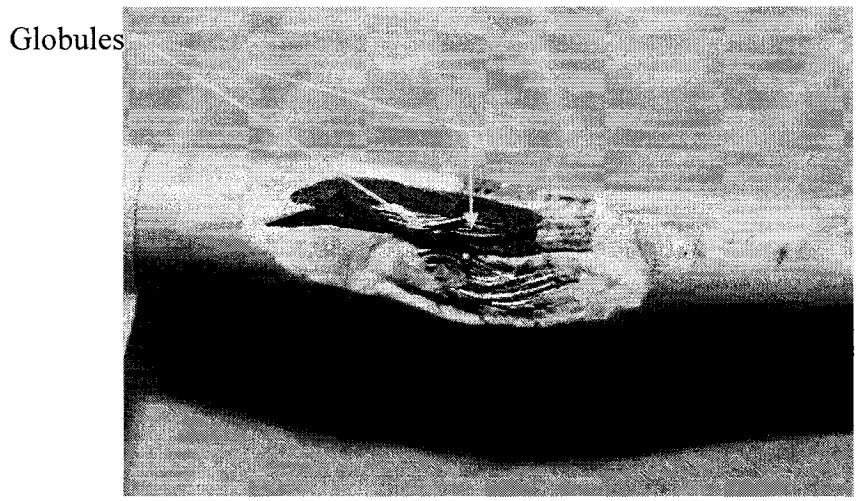


Figure 5.82 : Globules sphériques de fine taille créés par un court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre, Experts-Conseils CEP (2005)

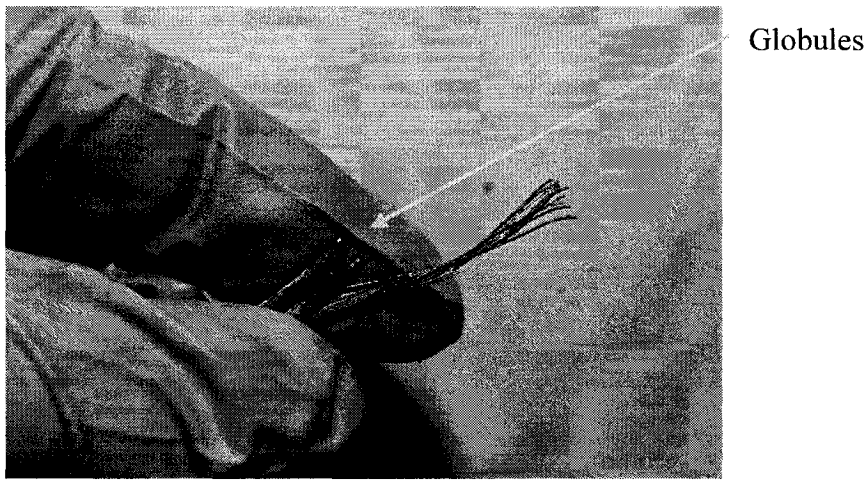


Figure 5.83 : Court-circuit ayant sectionné un conducteur de cuivre multibrins et laissant des globules aux extrémités, Experts-Conseils CEP (2005)

À plus fort grossissement, il est plus facile de noter et d'identifier les différents brins impliqués dans le court-circuit et leur fusion localisée . De plus, ce phénomène a entraîné des dommages ponctuels sur certains brins alors que les autres ne portent

aucune aspérité en surface et demeurent non affectés à un point tel que les lignes de mise en forme sont toujours visibles (figures 5.84 et 5.85).

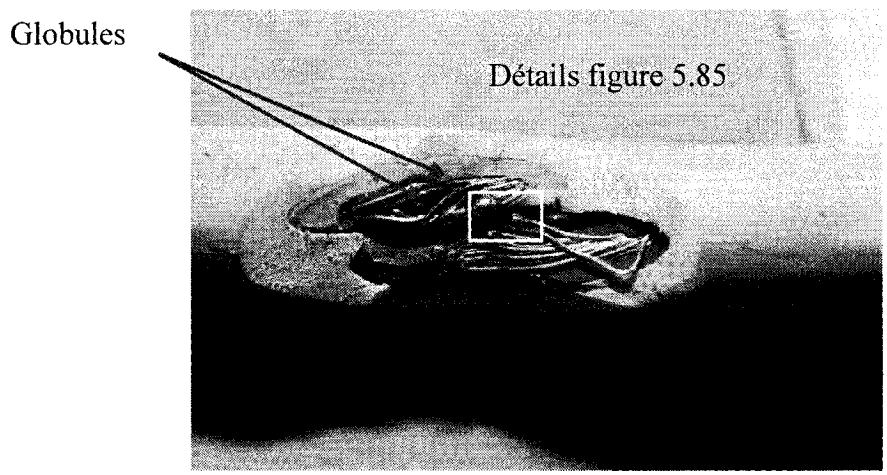


Figure 5.84 : Globules ponctuels générés par un court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre, Experts-Conseils CEP (2005)

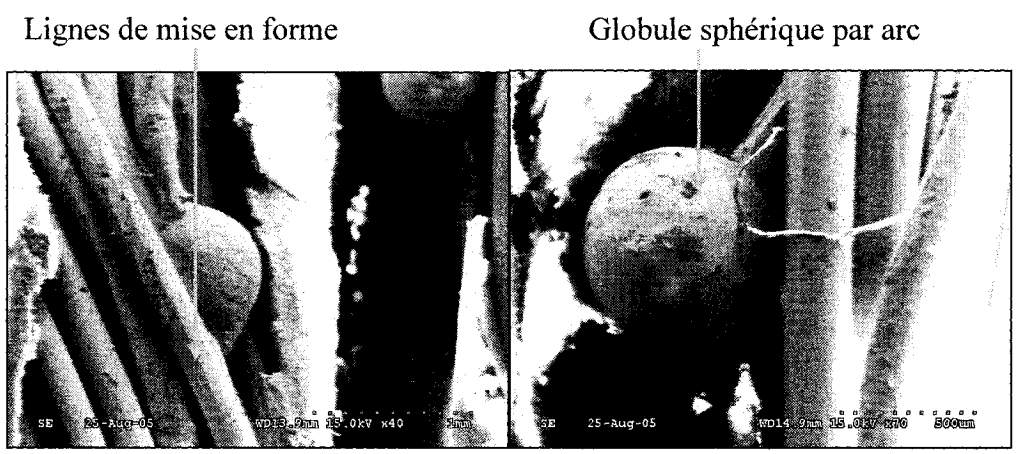


Figure 5.85 : Détails des endommagements par court-circuit sur des conducteurs de cuivre multibrins laissant des surfaces lisses, Experts-Conseils CEP (2005)

Ainsi, seuls quelques brins ont été affectés par l'arc électrique alors que ceux environnants portent encore les marques laissées par la mise en forme du conducteur.

De plus, c'est le métal issu de la mise en contact des deux conducteurs et de la fusion en ce point particulier qui a mené à la formation d'un globule sphérique. La morphologie de ce globule a également été influencée par la tension de surface du métal liquide sur celui solide. Il est intéressant de noter que les surfaces des zones endommagées sont lisses et ne montrent pratiquement aucun oxyde. D'ailleurs, il n'existe pas en surface de structure dendritique ou autre attribuable à la formation et à la croissance des oxydes de cuivre sur le métal dans la région de la trace de court-circuit.

Quant aux autres caractéristiques distinctives des surfaces endommagées par court-circuit par rapport à celles affectée thermiquement, elles incluaient également la présence de vagues de solidification engendrées par le métal liquide et sous forme de plasma sur les brins solides à partir du point de contact (figures 5.86 et 5.87). En fait, ces vagues en surface étaient attribuables à la solidification très rapide du cuivre liquide fondu par l'énergie du court-circuit.

Cependant, ces régions particulières affectées par court-circuit ne présentaient pas de structure de croissance des oxydes cachant ces signes de solidification rapide. Contrairement aux dommages thermiques, il n'existait pas de structure dendritique des oxydes en surface. Il est important de noter que les endommagements identifiés aux figures 5.86 et 5.87 ont la particularité de provenir d'échantillons différents obtenus respectivement suite à un essai en laboratoire et prélevé sur un site d'incendie. Il faut cependant noter que ces deux échantillons portent des signes microscopiques similaires, typiques de dommages reliés à des courts-circuits. Seules quelques particules provenant du milieu de l'incendie se sont déposées en surface lors de l'endommagement par court-circuit.

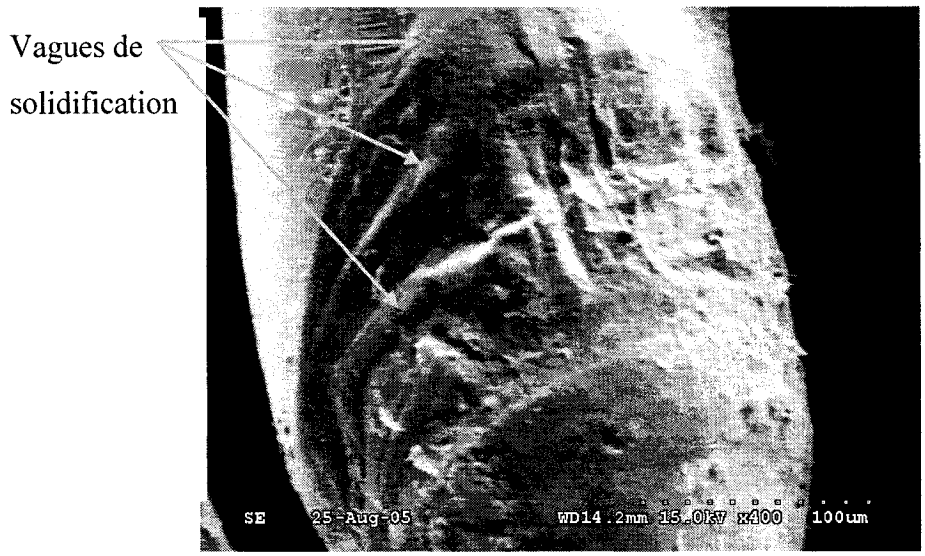


Figure 5.86 : Vagues de solidification produites en surface d'une zone affectée par court-circuit sur un conducteur de cuivre multibrins endommagé en laboratoire

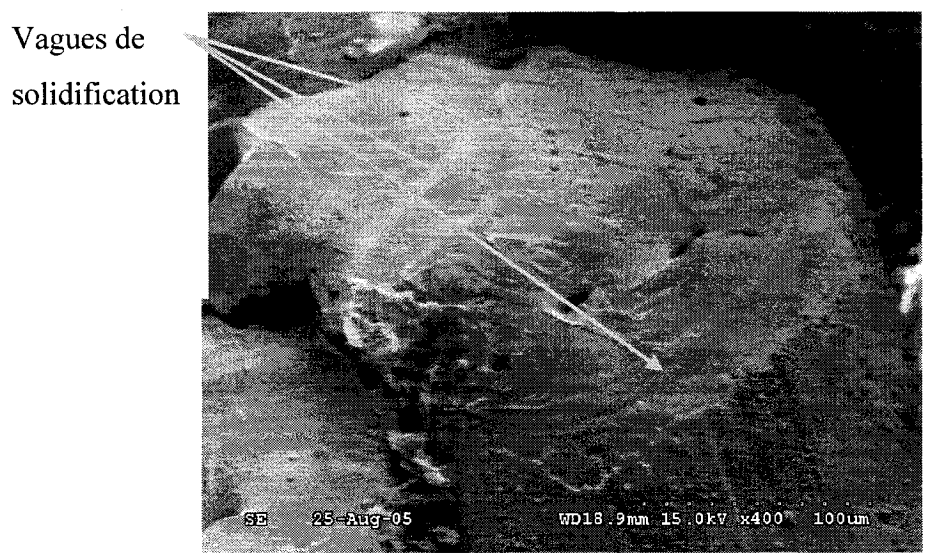


Figure 5.87: Vagues de solidification produites en surface d'une zone affectée par court-circuit sur un conducteur de cuivre multibrins prélevé sur une scène d'incendie

5.2.2.2 Analyse de composition par EDS

Les endommagements relatifs aux courts-circuits produits sur les conducteurs multibrins ont été analysés afin de déterminer les éléments retrouvés en surface. Ainsi, il a été noté que les zones endommagées sur les conducteurs multibrins (figure 5.88) de cuivre étaient principalement composées de cuivre et de peu d'oxygène contrairement aux endommagements thermiques (graphique 5.32), résultats concordants avec ceux obtenus des analyses de composition des régions de court-circuit sur les conducteurs de cuivre solides.

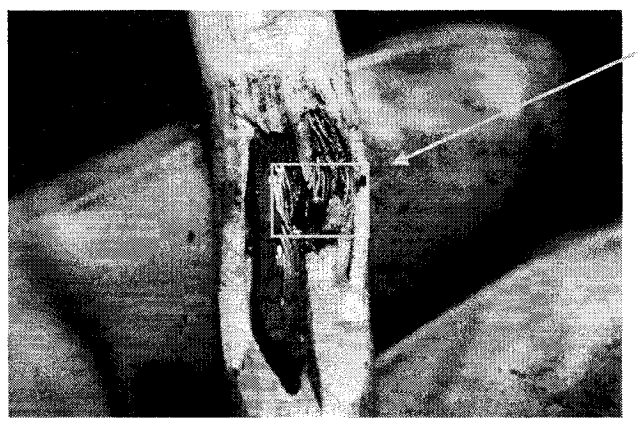
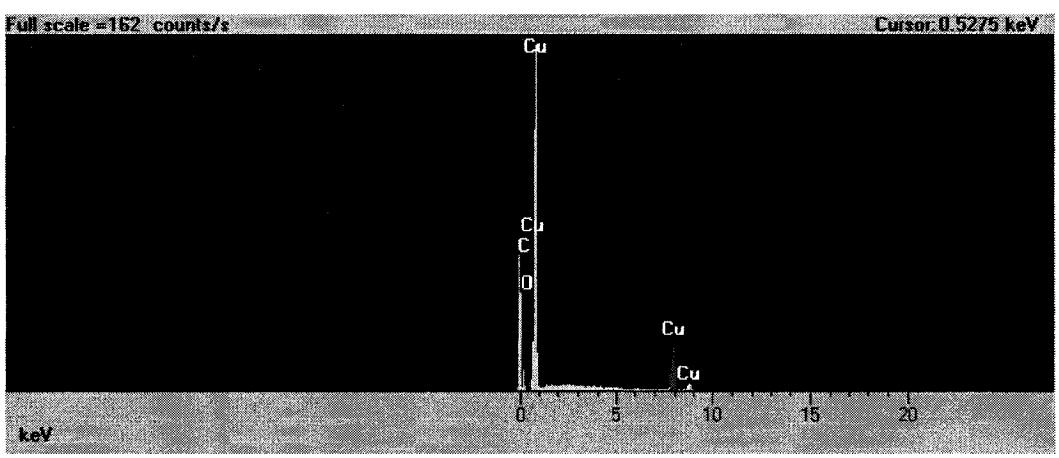


Figure 5.88 : Dommages par court-circuit sur un conducteur multibrins de cuivre



Graphique 5.32 : Analyse de surface du globule de cuivre de la zone définie à la figure 5.88

5.2.3 Courts-circuits aluminium-aluminium

Les courts-circuits faits sur des échantillons d'aluminium impliquaient des câbles comprenant des brins d'aluminium couramment employés dans le passé comme conducteurs électriques. Les essais de court-circuit en laboratoire ont été réalisés de la même façon que ceux impliquant des câbles de cuivre.

5.2.3.1 Examens macroscopiques et microscopiques

Les dommages relatifs aux courts-circuits observés en surface des conducteurs d'aluminium s'apparentent beaucoup à ceux décrits pour le cuivre à la section 5.2.1 précédente. Ils impliquaient au moins deux conducteurs et formaient principalement des globules de morphologie arrondie (figure 5.89). De plus, les régions endommagées étaient circonscrites aux environs du point de contact où avait eu lieu l'arc électrique.

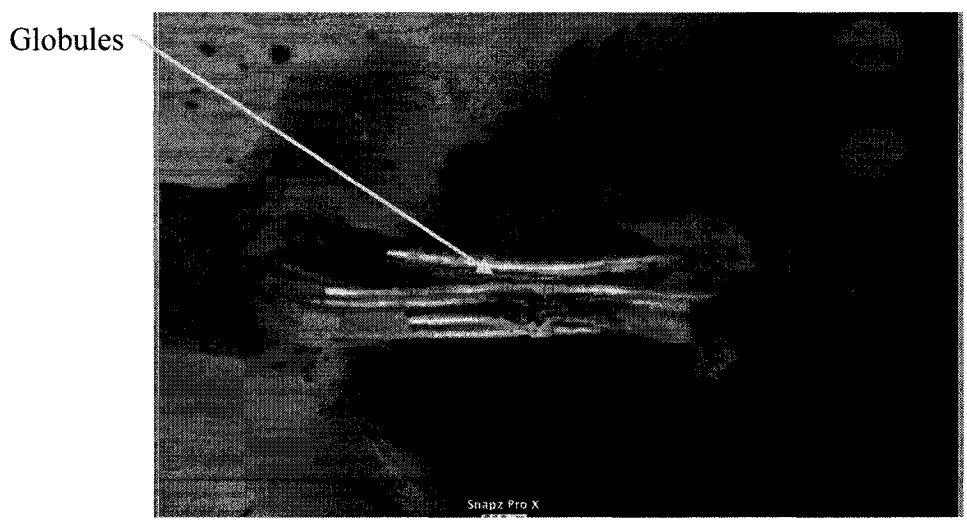


Figure 5.89 : Endommagement par court-circuit sur un câble d'aluminium, Experts-Conseils CEP (2005)

Une différence est toutefois à noter quant à l'étendue des régions affectées par un arc électrique sur les conducteurs d'aluminium par rapport à de tels dommages sur les conducteurs de cuivre. En effet, comme l'aluminium a une température de fusion plus faible, l'arc électrique a le potentiel de liquéfier une quantité plus importante de métal au point de contact, et donc d'engendrer une zone liquide plus étendue (figure 5.90). Cependant, la surface du métal dans celle-ci présente les mêmes caractéristiques que dans le cas des courts-circuits impliquant le cuivre. Ainsi, les surfaces endommagées sont lisses et montrent un relief arrondi. Il est intéressant également de noter que la surface du conducteur non affectée par la trace de court-circuit porte encore ses caractéristiques initiales dont le fini de surface et des dimensions d'origine.

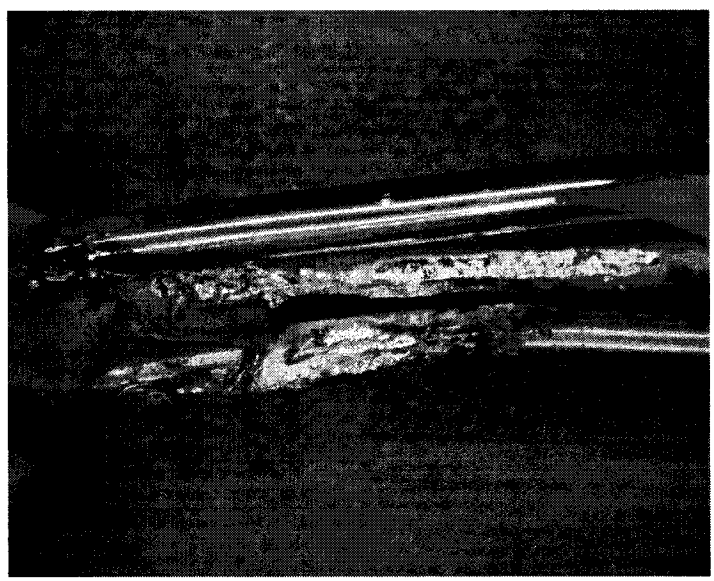


Figure 5.90 : Zones affectées par un arc électrique sur des conducteurs d'aluminium, Experts-Conseils CEP (2005)

À plus fort grossissement, les endommagements de nature électrique révèlent des caractéristiques similaires à celles démontrées pour les conducteurs de cuivre portant des traces de court-circuit. En fait, les surfaces dévoilent des vagues de solidification, lesquelles sont attribuables à la solidification très rapide du métal liquéfié

par l'arc électrique sur le reste de la surface du conducteur d'aluminium non fondue (figures 5.91 et 5.92).

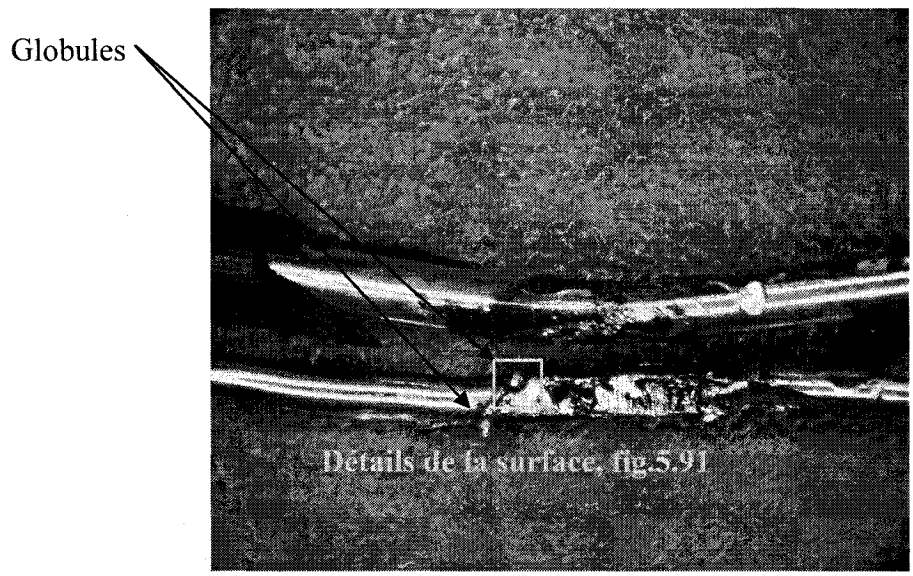


Figure 5.91 : Zone endommagée par un court-circuit et montrant des globules sur un conducteur d'aluminium (20X)

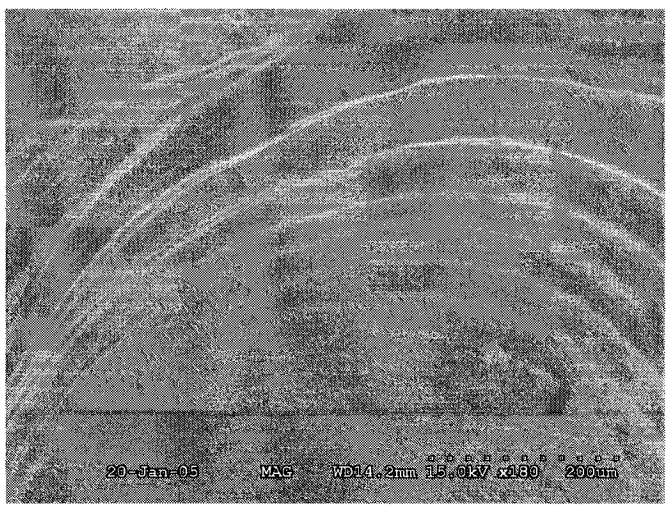


Figure 5.92 : Vagues de solidification sur un conducteur d'aluminium présentant une trace de court-circuit

5.2.3.2 Analyses de composition par EDS

Les différentes régions endommagées par court-circuit ont été analysées afin de révéler la présence des éléments se trouvant dans ce secteur particulier ainsi que des signes particuliers de la microstructure. Ainsi, il est ressorti que la zone affectée par court-circuit (figure 5.93) était composée principalement d'aluminium et d'oxygène (graphique 5.33).

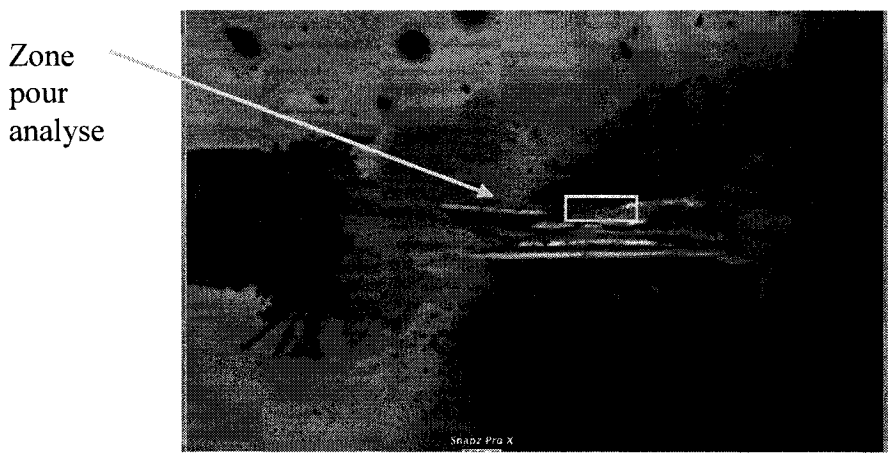
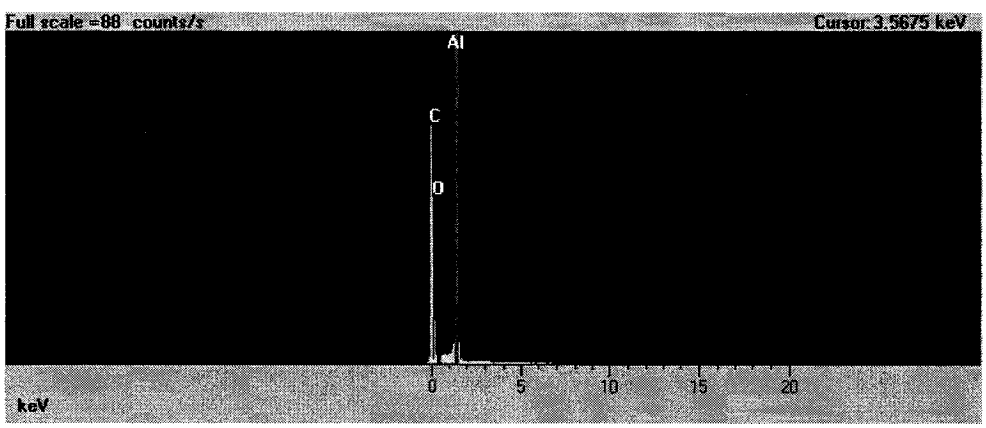


Figure 5.93 : Région endommagée par court-circuit sur un câble d'aluminium avec zone ciblée pour analyse de composition



Graphique 5.33 : Composition dans la région endommagée par court-circuit sur le câble d'aluminium

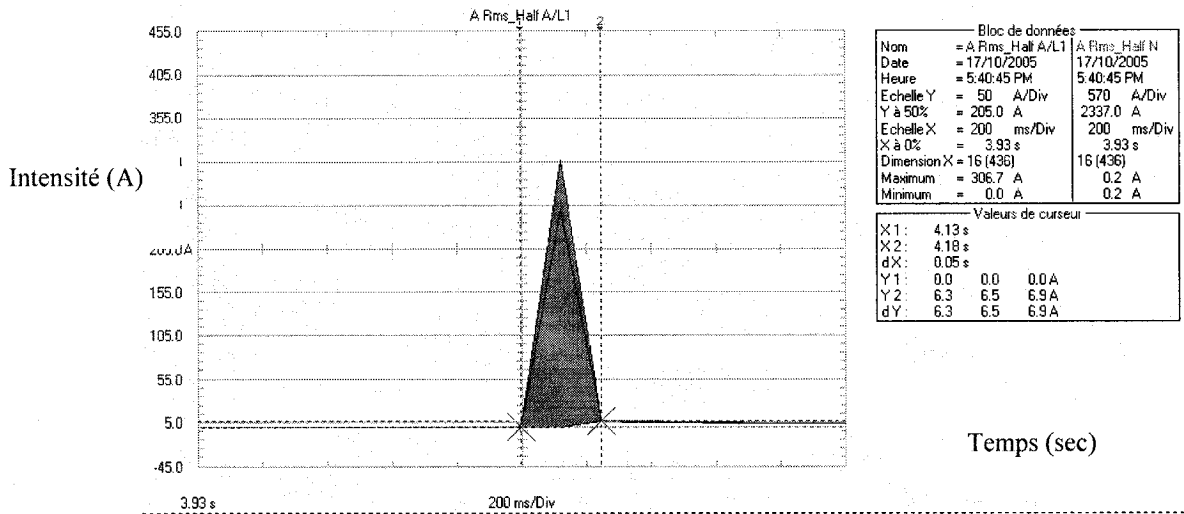
5.2.3.3 Énergie et paramètres électriques associés aux courts-circuits

Lors des essais de court-circuit sur les portions de câbles en aluminium, nous avons également mesuré les paramètres de nature électrique dont notamment le courant et la tension afin de calculer l'énergie du court-circuit. Ainsi, la perte de masse a été calculée en considérant les masses initiale et finale, avant et après le court-circuit.

Tout comme pour les essais impliquant les câbles de cuivre, ceux réalisés avec les conducteurs d'aluminium créaient des variations importantes dans le courant, mais la tension demeurait sensiblement stable, à 120 volts ou à 240 volts, tout dépendant des paramètres des essais.

De plus, les courts-circuits se sont produits pratiquement aussi rapidement que ceux réalisés sur les câbles de cuivre. En effet, les temps mesurés pour la réalisation des arcs électriques ne dépassaient pas plus de quelques centièmes de secondes. C'est d'ailleurs en considérant les paramètres électriques des courts-circuits ainsi que le temps que nous avons été en mesure de calculer l'énergie d'un tel phénomène, comme présenté à l'annexe 1. Mentionnons brièvement que nous avons calculé, à partir de la masse perdue et des enthalpies de liquéfaction et d'évaporation propres à l'aluminium, les énergies impliquées pour chacun des essais de court-circuit.

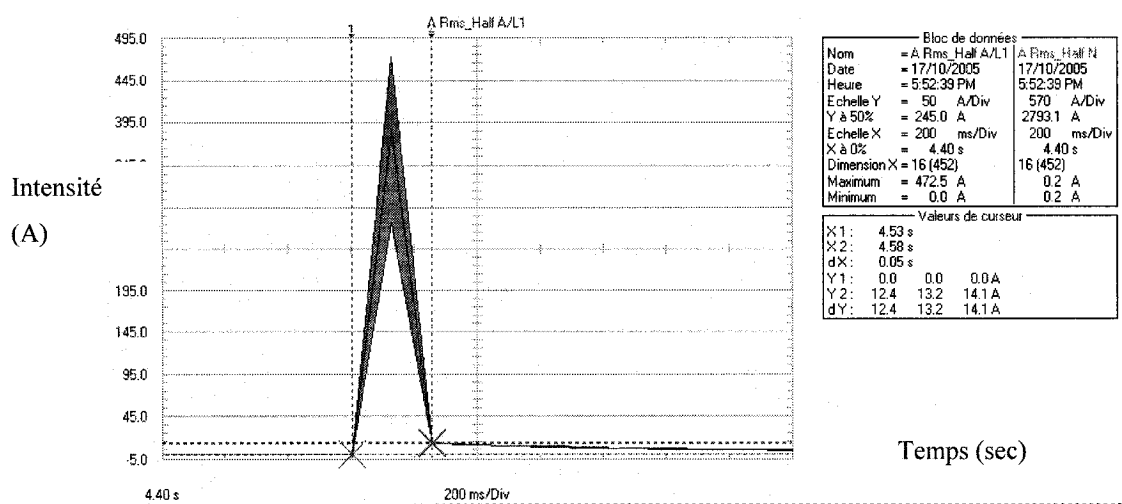
Ainsi, les énergies des courts-circuits associées aux conducteurs d'aluminium donnaient des valeurs légèrement plus faibles que celles obtenues dans le cas des essais impliquant le cuivre (graphiques 5.34 et 5.35). En fait, les énergies calculées étaient respectivement de 920,1 Joules et de 1417,5 Joules. Les temps de court-circuit demeuraient toutefois sensiblement les mêmes, soit de 0,05 secondes, et les pertes de masse également. Ces différents essais ont cependant été réalisés sans faire varier les paramètres des essais compte tenu du nombre restreint d'échantillons disponibles.



Court-circuit 24, 120V, aluminium 12/2, perte masse = 0,02g, E = 920,1J

Intensité maximale : 306,7 Ampères

Graphique 5.34 : Intensité de l'arc électrique sur un câble d'aluminium en fonction du temps, Experts-Conseils CEP, 2005



Court-circuit 25, 120V, aluminium 12/2, perte masse = 0,05g, E=1417,5J

Intensité maximale : 472,5 Ampères

Graphique 5.35 : Intensité de l'arc électrique sur un conducteur d'aluminium en fonction du temps, Experts-Conseils CEP, 2005

Tableau 5.2 : Paramètres et résultats des essais de court-circuit sur des conducteurs d'aluminium, Experts-Conseils CEP (2005)

Essais #	Calibre du câble	Tension (Volts)	Intensité maximale (Ampères)	Temps (sec)	Énergie (Joules)	Perte de masse (g)
21	12AWG	120	401	0,05	1383	0,01
22	12AWG	120	251,2	0,05	869,12	0,01
23	12AWG	120	434,4	0,05	1393,2	0,03
24	12AWG	120	306,7	0,05	920,1	0,02
25	12AWG	120	472,5	0,05	1417,5	0,05
26	12AWG	120	464,2	0,07	2227,68	0,04
27	12AWG	120	361	0,10	2814,88	0,05
28	12AWG	240	543,5	0,04	2168,8	0,05
29	12AWG	240	242,5	0,05	1807	0,02
30	12AWG	240	291,7	0,05	2680,32	0,03

5.2.4 Courts-circuits acier-aluminium

Les courts-circuits impliquant des conducteurs d'acier et d'aluminium ont été réalisés en mettant sous tension un câble triplex constitué d'un neutre porteur dont l'âme était en acier, lequel était recouvert de brins d'aluminium. Les arcs électriques ainsi engendrés ont été faits entre ce conducteur neutre et les conducteurs de charge constitués uniquement de brins d'aluminium.

5.2.4.1 Examens macroscopiques et microscopiques

D'emblée, la coloration des régions affectées par des arcs électriques générés entre de l'aluminium et le brin d'acier différait de celle obtenue par l'interaction

purement thermique de ces deux métaux, phénomène présenté à la section 5.1.5 précédente. En effet, la surface était plutôt lisse à l'emplacement du dommage par court-circuit, alors que le reste du conducteur d'acier laissait paraître un fini rugueux de couleur d'oxyde (figures 5.94 et 5.95).

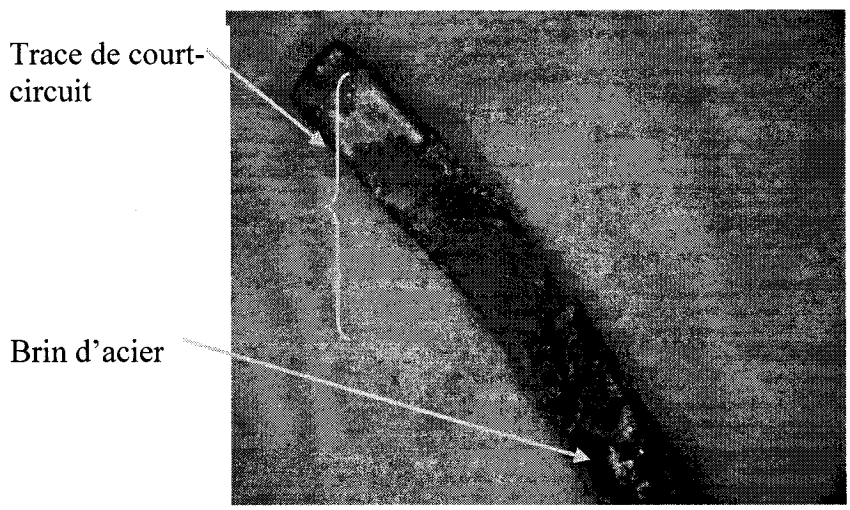


Figure 5.94 : Zone endommagée créée par un court-circuit entre de l'aluminium et un conducteur d'acier, échantillon prélevé sur un incendie

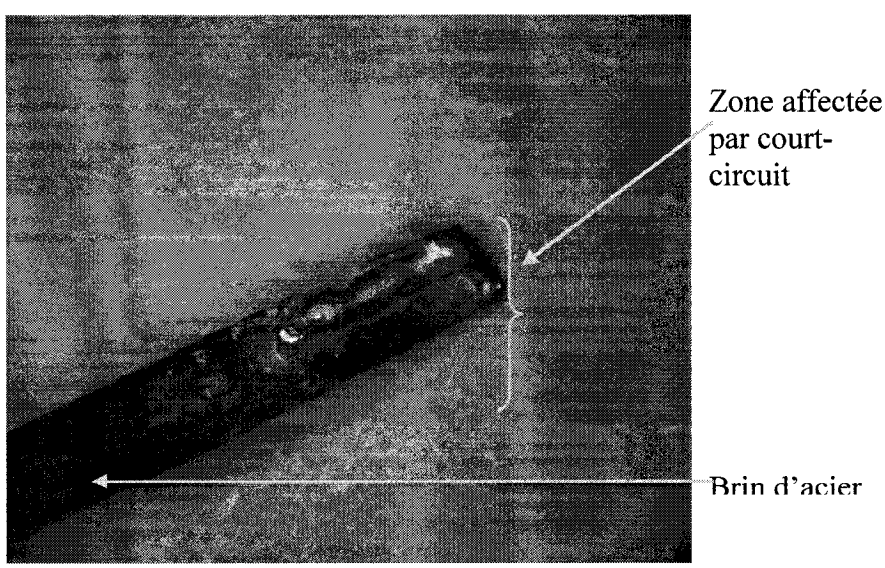


Figure 5.95 : Endommagement par court-circuit fait en laboratoire entre de l'aluminium et un brin d'acier

Il ressort, de l'examen de ces photographies, que les endommagements entre l'aluminium et l'acier créés par des arcs électriques ont engendré des morphologies similaires à celles décrites pour les autres métaux. Par conséquent, les zones affectées présentent une morphologie lisse et arrondie ayant entraîné la perte (trou ou dépression) ou le gain de métal (goutte ou globule) et ce, de façon très localisée (figure 5.96 et 5.97). De plus, ces zones ne sont pas recouvertes d'oxydes dont la formation a engendré des structures complexes, mais démontrent plutôt un fini lisse et uniforme. En fait, elles sont caractérisées par la présence de vagues de solidification formées suite à la solidification rapide du métal liquéfié sur le brin d'acier solide. Contrairement à la région endommagée par court-circuit, le reste de la surface du brin d'acier est recouverte d'oxydes de fer. Mentionnons qu'à partir du point de contact où le court-circuit a eu lieu, la région d'endommagement est symétrique et lisse. Il n'existe pas, contrairement aux endommagements thermiques, de multiples porosités ni de structures dendritiques résultant de la croissance des oxydes.

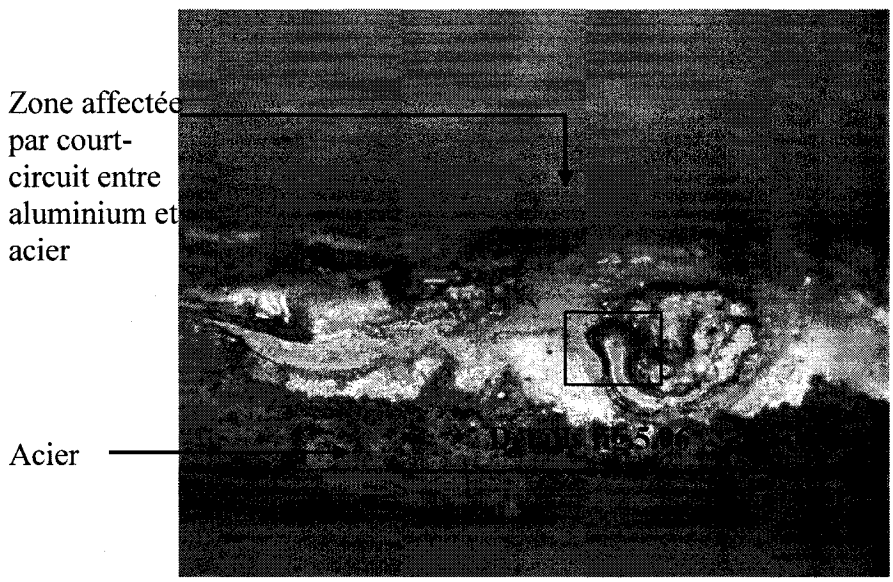


Figure 5.96 : Zone affectée par un court-circuit entre l'acier et l'aluminium (20X)

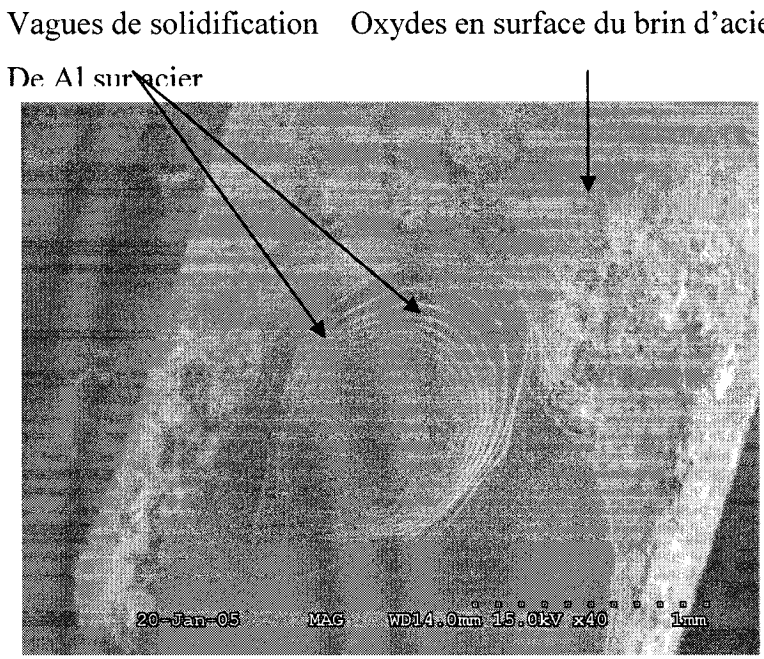


Figure 5.97 : Zone d'endommagement créé par un court-circuit entre l'aluminium et un brin d'acier

5.2.4.2 Analyses de composition chimique par EDS et microstructures des sections

Comme la coloration des conducteurs d'acier et d'aluminium peut être similaire puisque ce sont deux métaux de couleur sensiblement grise, il n'est pas toujours évident de reconnaître la présence d'un autre métal dans la zone endommagée en surface du conducteur d'acier. Ainsi, des analyses de composition chimique permettent justement d'identifier l'ensemble des éléments compris dans une région particulière. La figure 5.98 identifie les différentes zones où les analyses présentées aux graphiques 5.36 et 5.37 ont été réalisées.

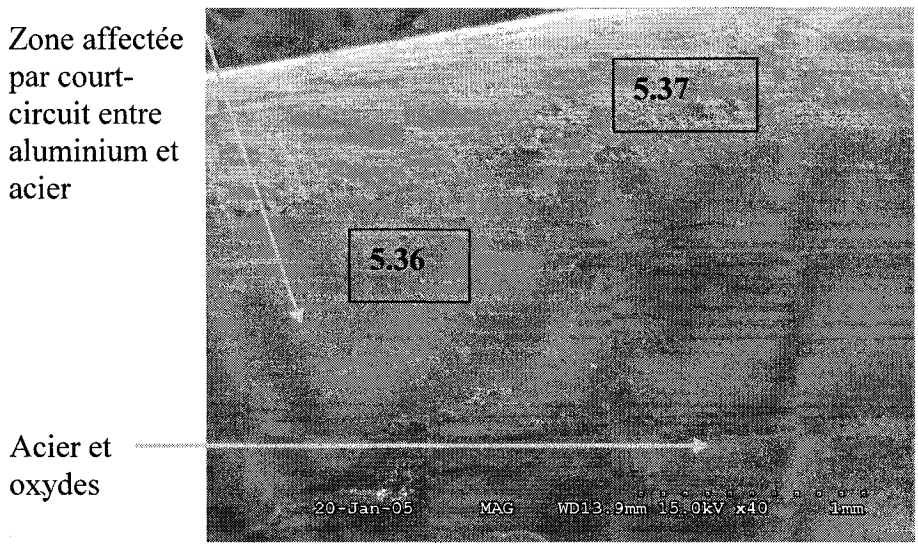
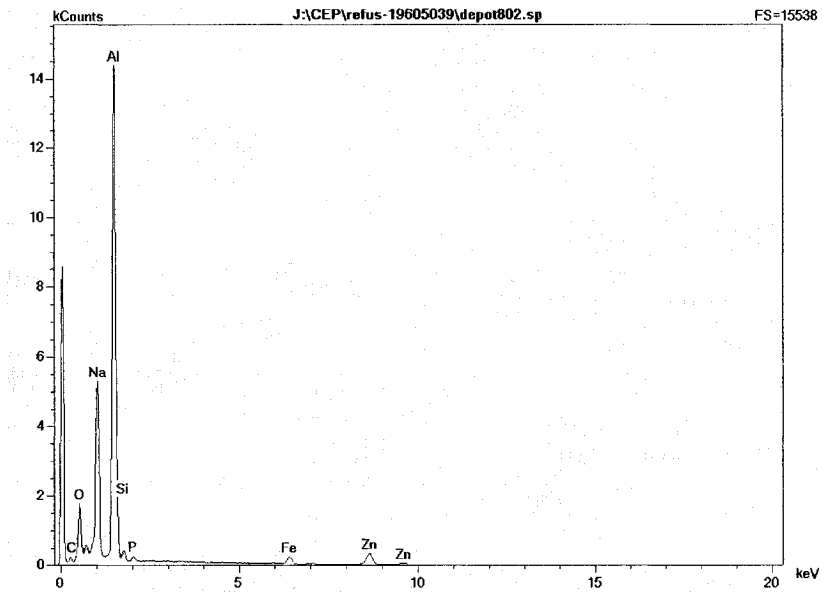
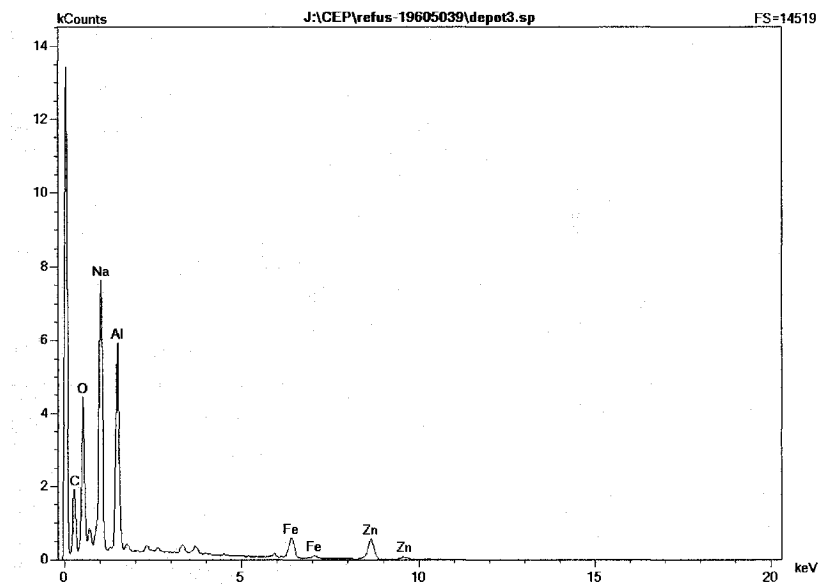


Figure 5.98 : Régions où ont été faites les analyses de composition sur le conducteur d'acier

L'examen du graphique 5.36 montre clairement que la présence d'aluminium domine dans la région où s'est produit l'arc électrique entre l'acier et l'aluminium. Quant au graphique 5.37 , il révèle également la présence d'aluminium mais en quantité moindre puisqu'il s'agit de la surface du brin d'acier à proximité de la zone endommagée. Ces résultats s'apparentent tout de même à ceux obtenus dans le cas des dommages purement thermiques entre l'aluminium et l'acier. Mentionnons que le zinc provient du conducteur d'acier, lequel est recouvert de zinc.



Graphique 5.36 : Analyse de composition dans la zone endommagée par court-circuit entre l'aluminium et l'acier



Graphique 5.37 : Analyse de composition en surface du conducteur d'acier, près de la trace de court-circuit impliquant l'aluminium

Les analyses des échantillons d'acier présentant des dommages de nature électrique ayant impliqués de l'aluminium montrent des caractéristiques importantes quant à l'affectation de la microstructure du brin d'acier par l'aluminium au point de court-circuit. En effet, il existe, par comparaison avec une zone soudée, une région particulière où les grains de l'acier ont subi des endommagements relatifs aux hautes températures engendrées par le court-circuit. Plus précisément, à partir du point de contact, le métal est influencé sur une certaine épaisseur, mais sans affecter tout le diamètre du conducteur (figure 5.99). La conductivité thermique de l'acier était beaucoup plus petite que celle du cuivre ou de l'aluminium. Le phénomène s'apparente à un apport localisé de chaleur suivi d'une trempe, changeant ainsi localement la microstructure de l'acier dans l'environnement du court-circuit, ce qui équivaut à la zone affectée thermiquement d'une soudure.

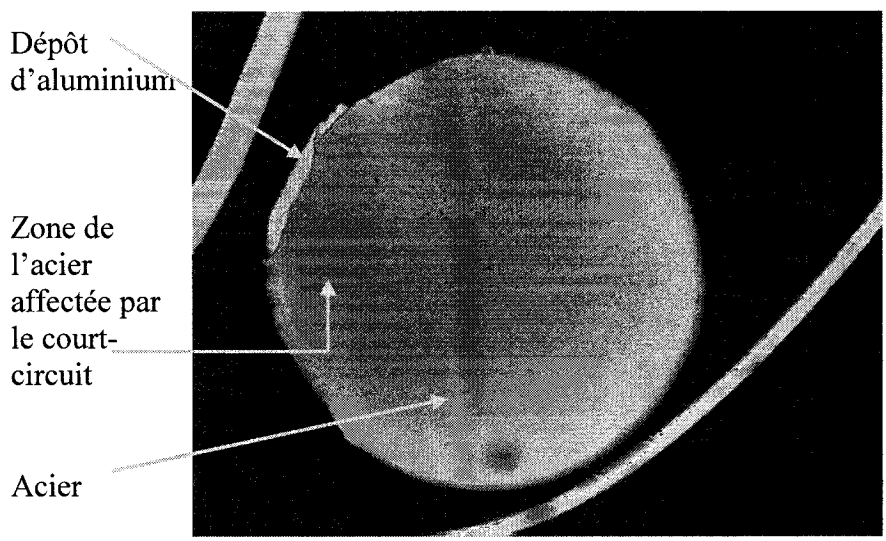
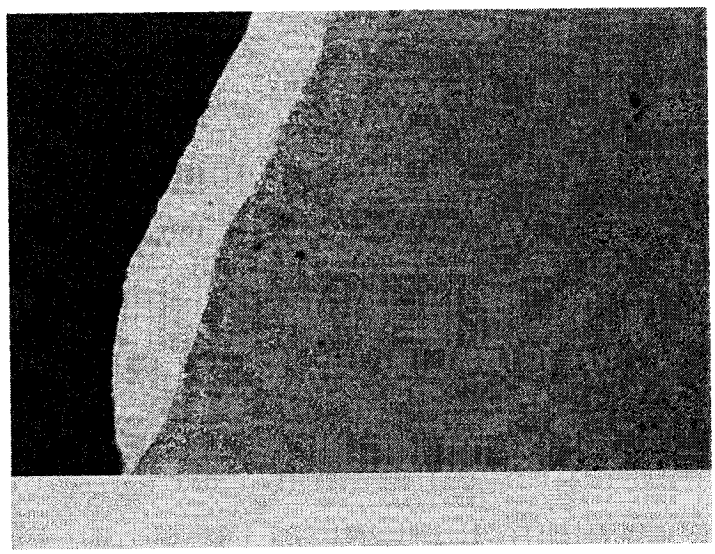


Figure 5.99 : Zone localisée affectée par un court-circuit entre l'aluminium et l'acier (25X)

En plus de la région affectée thermiquement par les hautes températures générées lors du court-circuit, il existe une interaction entre les métaux au point de court-circuit. Cette interaction a toutefois été très rapide, limitant alors la formation des

intermétalliques entre le fer et l'aluminium. Cependant, les grains les plus près du dépôt d'aluminium ont subi une croissance supérieure à ceux du reste de la zone affectée (figure 5.100).