



HAL
open science

Mise en service d'un laboratoire d'essais incendies pour câbles. Création d'un programme pour base de données en VBA

Hakan Zeki

► To cite this version:

Hakan Zeki. Mise en service d'un laboratoire d'essais incendies pour câbles. Création d'un programme pour base de données en VBA. Génie chimique. 2011. dumas-01064520

HAL Id: dumas-01064520

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01064520>

Submitted on 16 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

le cnam



Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM
Par Hakan ZEKI
Soutenu le 6 juillet 2011

Mise en Service d'un Laboratoire
d'Essais Incendies pour Câbles.
Création d'un Programme pour Base
de Données en VBA.

Filiale Turque du Groupe NEXANS
Site de TUZLA



JURY

Alain DELACROIX, Professeur titulaire de la chaire de chimie industrielle génie des procédés

Isabelle MABILLE, Maître de conférences à l'université Pierre et Marie Curie

Catherine PORTE, Professeur des universités au Conservatoire National des Arts et Métiers

Gérard BACQUET, Directeur R&D Corporate chez NEXANS

Frédéric LEISING, Professeur et chercheur associé chez CHRYSO

Remerciements

Avant de commencer la présentation de mes travaux je tiens à remercier les personnes qui m'ont permis de suivre ma formation d'ingénieur. Je vais procéder par ordre chronologique.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et aidé dans mes choix.

Merci aux enseignants et à l'enseignement de l'ETSCO à Angers. Durant ces deux années, j'ai acquis mes bases solides en chimie et procédés de fabrication. C'est à l'ETSCO qu'est né mon désir d'exercer le métier d'ingénieur.

Je remercie Henri FAUDUET, professeur à l'IUT de Chimie d'Orléans et responsable de la licence professionnelle de productique chimique, pour son enseignement et aussi pour m'avoir orienté vers la formation d'ingénieur du CNAM.

Que mes collègues, du pôle R & D de CHRYSO, sachent combien j'ai apprécié leurs aides et soutiens lors de ma formation au CNAM. En particulier Frédéric LEISING, mon tuteur en entreprise, pour son investissement durant mon cursus au CNAM. Ses connaissances et sa pédagogie ont cultivé chaque jour mon esprit critique et scientifique.

Je remercie les enseignants de la chaire de Génie des Procédés – Chimie Industrielle du CNAM, à savoir Alain DELACROIX, Catherine PORTE, Jean-Louis HAVET, Marie DEBACQ-LEPASSAT, Vincent CAQUERET et Stéphane VITU pour les savoirs qu'ils m'ont donné et surtout pour le soutien apporté en plus des cours. Mention spéciale à Catherine PORTE pour tout ce qu'elle fait en plus pour faciliter nos formations.

J'exprime ma reconnaissance à Gérard BACQUET, responsable R&D corporate chez NEXANS France, pour m'avoir beaucoup aidé dans mes recherches de stage. Je remercie aussi particulièrement Kamil MUTLU, directeur qualité-contrôle chez NEXANS Tuzla, et Sultan KÖŞEOĞLU-DİNÇER, ingénieure chimiste chez NEXANS Tuzla, pour leurs accueils et leurs encadrements.

Je ne saurais oublier le FONGECIF Centre pour le financement de ces neuf mois de formation, et l'entreprise NEXANS de Tuzla pour m'avoir accueilli au sein de son site pour ce stage.

SOMMAIRE

Sommaire	
Tables des Illustrations.....	
Table des Tableaux.....	
Nomenclature	
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Le Groupe Nexans.....	2
I. Présentation générale du groupe	2
I.1) Histoire.....	2
I.2) Secteur d'activité	2
I.3) Chiffre d'affaire et effectifs	2
II. Les quelques chantiers phares	3
II.1) Câbles sous marin.....	3
II.2) Réseaux ferroviaires	3
II.3) Automobile.....	4
II.4) Bâtiment	4
III. Présentation de la filiale en Turquie.....	4
III.1) Site de Tuzla.....	5
III.2) Les laboratoires de Tuzla	5
III.3) Configuration du stage	5
IV. Conclusion.....	5
Chapitre 2 : Fabrications des Câbles	6
I. Schéma de fabrication générale et aperçu de quelques câbles	6
I.1) Câbles de télécommunications avec âme conductrice métallique	7
I.2) Câbles de transmissions d'énergies électriques	7
II. Mise en forme des métaux : tréfilage, recuit et assemblage des fils élémentaires	8
II.1) Le tréfilage des métaux	8
II.2) Recuit du fil tréfilé	10
II.3) Assemblage des fils élémentaires.....	10
III. Mise en forme des polymères : l'extrusion	12
III.1) L'extrusion réactive : Réticulation.....	13
III.2) L'extrusion réactive : Moussage	17
IV. Refroidissement.....	18
V. Contrôle du procédé	19
V.1) Mesure de circularité	19
V.2) Mesure d'excentricité.....	20
V.3) Contrôle des défauts d'isolation.....	20
V.4) Mesure de capacité pour les câbles de télécommunication.....	21
VI. Exemples d'éléments de construction d'un câble	23
VI.1) Bande de mica	23
VI.2) Bande de polyester	23
VI.3) Ecran aluminium	23
VI.4) Armure métallique.....	24
VI.5) Bourrage.....	25
VI.6) Divers	25
VII. Conclusion.....	25

Chapitre 3 : Phénomènes de la Combustion.....	26
I. Généralités sur la combustion	26
I.1) Définition et paramètre de combustion	26
I.2) Réaction globale de la combustion d'un hydrocarbure.....	28
I.3) Cinétique chimique et étapes réactionnelles	28
I.4) Formation de la suie	29
II. Combustion des polymères	30
II.1) Processus en jeu	30
II.2) Echauffement	31
II.3) Dégradation thermique.....	31
II.4) L'inflammation.....	31
II.5) Combustion et propagation de la flamme	32
II.6) Natures et compositions des produits de combustion	34
III. Adjuvant retardateur de flamme.....	35
III.1) Mécanismes d'actions des retardateurs de flammes	35
III.2) Retardateurs de flammes aux halogènes	36
III.3) Les retardateurs de flammes azotés.....	38
III.4) Les retardateurs de flammes inorganiques ou minéraux.....	39
III.5) Retardateurs de flammes contenant du bore.....	40
III.6) Les systèmes intumescents.....	40
IV. Formulation des polymères résistants aux incendies	41
IV.1) Choix du polymère	41
IV.2) Choix des retardateurs de flammes	41
IV.3) Dénomination	41
IV.4) Législation.....	41
V. Conclusion.....	43
Chapitre 4 : Mise en Service du Laboratoire d'Essais Incendie	44
I. Configuration de l'espace.....	44
I.1) Plan du laboratoire et instruments à dispositions	44
I.2) Détection des besoins généraux et aménagements.....	45
II. Configurations et besoins des installations	46
II.1) Propagation de Flamme essais IEC 60332-1 et IEC 60332-2.....	46
II.2) Densité de fumées, essai IEC-61034.....	50
II.3) Essai de résistance des câbles aux incendies IEC 60331	55
II.4) Propagation d'incendie IEC 60332-3	57
II.5) Essai de détermination de la quantité de gaz acide halogéné dans les fumées... ..	60
II.6) Essai de détermination de la corrosivité des fumées de combustion par	64
II.7) Détermination de l'indice d'oxygène (Oxygene Index) ISO 4589	65
II.8) Conclusion.....	66
III. Zones de stockage	67
III.1) Stockage des bouteilles de gaz	67
III.2) Stockage des solvants et produits chimiques	67
IV. Analyse des risques	68
IV.1) Atmosphère explosive : réglementation ATEX	68
IV.2) Propagation d'incendie dans le laboratoire	69
IV.3) Risques chimiques.....	69
V. Répétabilité et reproductibilités des mesures	70
V.1) Densité de fumées IEC-60134.....	70
V.2) Propagation de flamme IEC-60332-1	74
V.3) Autres essais standards.....	75
VI. Formation des personnes aux réalisations des essais	76
VII. Conclusions sur la mise en service du laboratoire	78

Chapitre 5 : Comparaisons des Comportements de Combustions des Câbles NEXANS	79
I. Densité de fumées sur des câbles de gros diamètre : standard IEC-60134	79
I.1) Echantillons	79
I.2) Câble d'énergie avec écran aluminium et armure en acier	79
I.3) Câble d'énergie sans protection	80
I.4) Conclusion sur l'impact des protections sur la densité de fumées	81
II. Essai d'intégrité du circuit durant un incendie : résistance aux incendies IEC-60331 ...	82
II.1) Echantillon	82
II.2) Essai IEC-60331	82
II.3) Essais dans les conditions IEC60331 mais avec une tension supérieure	83
II.4) Conclusions sur l'intégrité du câble soumis à un incendie	83
III. Comparaison des essais de propagation de flamme IEC60332-1 et de propagation... 84	84
III.1) Echantillon	84
III.2) Essais de propagation de flamme suivant la norme IEC 60332-1	84
III.3) Essais de propagation d'incendie suivant la norme IEC60332-3	85
III.4) Conclusion sur la comparaison des essais de propagations de flamme... ..	86
IV. Impact de l'épaisseur de la gaine sur la propagation de flamme : IEC60332-1	87
IV.1) Echantillons	87
IV.2) Résultats des essais de propagation de flamme IEC 60332-1	87
IV.3) Conclusion sur l'impact de l'épaisseur du gainage sur la propagation de... ..	87
V. Impact du masterbatch (agent colorant) et du matériau de gainage	88
V.1) Echantillons	88
V.2) Essais de propagation de flamme IEC 60332-1	88
V.3) Essais de densité de fumées IEC 61034	88
V.4) Dosage des ions chlorures dans les fumées de combustion IEC 60754-1	89
V.5) Conclusion	89
VI. Conclusions sur les essais	90
Chapitre 6 : Programme VBA pour Enregistrer, Calculer, Comparer et Présenter... ..	91
I. Généralités et besoins	91
I.1) Vue d'ensemble	91
I.2) Besoins	91
II. Choix du langage de programmation et outils à dispositions	92
II.1) Choix du langage de programmation	92
II.2) Outils à dispositions	92
III. Architecture du programme	93
III.1) Construction générale	93
III.2) Mise en forme visuelle	94
IV. Lancer le programme	94
V. Choix du type d'échantillon, du type de câble et renseignements sur l'échantillon	95
VI. Construction du câble (pour les essais sur câble)	98
VI.1) Câbles pour basses tensions	98
VI.2) Câbles LAN Cat5 et Cat6	101
VII. Choix des essais et saisie des résultats	102
VII.1) Essais sur câble	102
VII.2) Essais sur matière première	118
VIII. Entrer le ou les noms des opérateurs	120
IX. Créations de la feuille de résultats	122
IX.1) Ouvrir un nouveau classeur : Macro « NouvelPage »	122
IX.2) Construction du câble	123
IX.3) Résultats des essais	126
X. Conclusions	129
Conclusions Générales	131
Bibliographie	132
Annexe	138

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Chapitre 1 : Le Groupe Nexans.....	2
Figure 1.1 : Logo du groupe Nexans [3].....	2
Figure 1.2 : Planisphère des filiales du groupe Nexans [4].....	2
Figure 1.3 : Navire câblé du groupe « le C/S NEXANS SKAGGERAK » [5].....	3
Figure 1.4 : Train à grande vitesse chinois [6].....	3
Figure 1.5 : Robot de la NASA [7].....	4
Figure 1.6 : Stade Olympique de Pékin [8].....	4
Figure 1.7 : Implantations de Nexans en Turquie [document interne].....	4
Chapitre 2 : Fabrications des Câbles.....	6
Figure 2.1 : Ligne générale de fabrication des câbles [10].....	6
Figure 2.2 : Câble LAN [10].....	7
Figure 2.3 : Câble coaxial [10].....	7
Figure 2.4 : Câble basse tension <1kV [10].....	7
Figure 2.5 : Câble d'énergie jusqu'à 500 kV [10].....	7
Figure 2.6 : Passage du fil dans la filière [13].....	8
Figure 2.7 : Machine de tréfilage continue [13].....	9
Figure 2.8 : Machine à glissement [14].....	9
Figure 2.9 : Tréfilage et recuit du fil [11].....	10
Figure 2.10 : Câble avec âme toronnée de classe 2 [17].....	11
Figure 2.11 : Câbles avec âmes toronnées et compactées de classe 2[18].....	11
Figure 2.12 : Âme flexible [19].....	11
Figure 2.13 : Procédé d'extrusion [11].....	12
Figure 2.14 : Tête pour l'extrusion des câbles [11].....	12
Figure 2.15 : Distributeur à canal de répartitions [11].....	12
Figure 2.16 : Répartition et écoulement dans la tête d'extrusion [11].....	12
Figure 2.17 : Outillage pression [11].....	13
Figure 2.18 : Outillage tube [11].....	13
Figure 2.19 : Structure moléculaire du PE-L [21].....	13
Figure 2.20 : Structure moléculaire du PE-R [21].....	13
Figure 2.21 : Résistance du PE à la température [11].....	14
Figure 2.22 : Résistance du PE-R à la température [11].....	14
Figure 2.23 : Principe de réticulation aux peroxydes [11].....	14
Figure 2.24 : Réticulation aux silanes en une étape [23].....	15
Figure 2.25 : Réticulation aux silanes en deux étapes [23].....	15
Figure 2.26 : Procédé en copolymérisation de l'éthylène avec le silane [23].....	16
Figure 2.27 : Mécanisme de réticulation à l'aide de silanes [11].....	16
Figure 2.28 : Décomposition de l'azodicarbonamide [11].....	17
Figure 2.29 : schéma d'un fil conducteur simple durant refroidissement.....	18
Figure 2.30 : Mesure de circularité sur une ligne d'isolation [10].....	19
Figure 2.31 : Système de mesure du diamètre par faisceaux collimatés [10].....	19
Figure 2.32 : Système de mesure du diamètre par frange de diffraction [10].....	20
Figure 2.33 : Défauts d'isolation [10].....	20
Figure 2.34 : Détection d'une bosse ou d'une striction par faisceaux infrarouges [10].....	21
Figure 2.35 : Comportement condensateur d'un câble coaxiale [10].....	21
Figure 2.36 : Mica muscovite naturelle [27].....	23
Figure 2.37 : Bande de mica enroulé sur l'âme.....	23
Figure 2.38 : Ecran aluminium autour des conducteurs.....	23
Figure 2.39 : Ceinture radial [25].....	24
Figure 2.40 : Ceinture non radial [25].....	24
Figure 2.41 : Câble armé [25].....	24

Figure 2.42 : Câble sous-marin 20 kV [12].....	25
Chapitre 3 : Phénomènes de la Combustion.....	26
Figure 3.1 : Triangle du feu [29].....	26
Figure 3.2 : Formation d'hydrocarbure aromatique polycyclique à partir du benzène [28]	29
Figure 3.3 : Formation de la suie [28].....	29
Figure 3.4 : Processus mis en jeu lors de la combustion [30].....	30
Figure 3.5 : Détermination du flux critique minimal sur un échantillon de PMMA [30].....	32
Figure 3.6 : Comparaison des flux massique de combustion et de pyrolyse sur un.....	33
Figure 3.7 : Molécules aromatiques bromées utilisables comme additifs [31].....	36
Figure 3.8 : Molécules aromatiques bromées utilisables comme additifs réactifs [31].....	37
Figure 3.9 : Molécules bromées aliphatiques retardateur de flamme [31].....	37
Figure 3.10 : Retardateurs de flammes chlorés [31].....	37
Figure 3.11 : Exemples de molécules retardateurs de flamme azotées [31].....	38
Chapitre 4 : Mise en Service du Laboratoire d'Essais Incendie	44
Figure 4.1 : Plan au sol initial du laboratoire (novembre 2009)	44
Figure 4.2 : Plans au sol du laboratoire avant et après les aménagements.....	45
Figure 4.3 : Cabine d'essais	46
Figure 4.4 : Flamme de 1kW pré-mélange d'air et de propane.....	47
Figure 4.5 : Positionnement du brûleur [35].....	47
Figure 4.6 : Flamme de diffusion au propane	48
Figure 4.7 :Positionnement du brûleur [37]	48
Figure 4.8 : Conformité du câble et validité de l'essai [64 ; 66].....	48
Figure 4.9 : Installation pour les essais de propagation de flamme.	49
Figure 4.10 : Cabine pour densité de fumées en vue de dessus	50
Figure 4.11 : Faisceau de câble fin [40].....	50
Figure 4.12 : Combustion de l'échantillon.....	51
Figure 4.13 : Mesure de l'intensité lumineuse transmise à travers les fumées	51
Figure 4.14 : Cabine d'essai de mesure de densité de fumées	52
Graphique 4.1 : Mesure de la densité de fumées lors de la combustion d'un câble	54
Figure 4.15 : Schéma électrique du montage de l'essai [44]	55
Figure 4.16 : Appareillages d'essais pour IEC 60331.....	55
Figure 4.17 : Cabine d'essai [45]	57
Figure 4.18 : Cabine vue du dessus [45].....	57
Figure 4.19 : Cabine d'essai de propagation d'incendie et débitmètres.....	59
Figure 4.20 : Appareillage d'essai pour la mesure de la quantité d'HCl dans les fumées.	60
Graphique 4.2 : Cycle de chauffage conforme au standard IEC 754-1.....	61
Figure 4.21 : Installation pour les essais de mesure de pourcentage d'HCl, pH.....	63
Figure 4.22 : Dispositif pour la mesure de l'indice d'oxygène [53]	65
Figure 4.23 : Zones ATEX.....	68
Figure 4.24 : Graphique pour les mesures des essais de répétabilité sur le toluène à 10%	70
Figure 4.29 : Exemple d'illustration pour la rédaction des modes opératoires.....	77
Chapitre 5 : Comparaisons des Comportements de Combustions des Câbles NEXANS	79
Figure 5.1 : Construction du câble testé.....	79
Figure 5.2 : Analyse de la combustion.....	80
Figure 5.3 : Analyse de la combustion.....	80
Figure 5.4 : Analyse de la combustion.....	80
Graphique 5.1 : Comparaison des courbes de transmission de lumières	81
Figure 5.5 : Schéma simplifié de la vue de coupe du câble testé.	82
Figure 5.6 : Coupe de l'échantillon testé suivant les deux types d'essais.....	84
Figure 5.7 : Application de la flamme.....	84
Figure 5.8 : Propagation de la flamme	84

Figure 5.9 : Extinction de la flamme.....	84
Figure 5.10 : Mesure de l'essai	85
Figure 5.11 : Observation de la combustion	85
Figure 5.12 : Combustion des câbles sur l'échelle.....	86
Figure 5.13 : Tronçons de câbles sur l'échelle après l'essai.....	86
Figure 5.14 : Echantillon LAN avec une épaisseur de gaine variable	87
Graphique 5.2 : Essais de densité de fumées sur câble LAN.....	88
Chapitre 6 : Programme VBA pour Enregistrer, Calculer, Comparer et Présenter les... ..	91
Figure 6.1 : Construction d'une Userform	92
Figure 6.2 : Construction générale du programme VBA	93
Figure 6.3 : Présentation du Programme VBA	94
Figure 6.4 : MsgBox1 confirmation du lancement du programme.....	94
Figure 6.5 : Userform1 choix du type d'échantillon, de câble et identification.....	95
Figure 6.6 : Userform2 pour la construction d'un câble basse tension.....	98
Figure 6.7 : Userform3 pour le choix du type de câble LAN.....	101
Figure 6.8 : la Userform5 se modifie suivant un choix.....	102
Figure 6.9 : Essai de propagation de flamme sur la Page1 de la Userform5	103
Figure 6.10 : Essai de densité de fumée sur la Page2 de la Userform5	105
Figure 6.11 : Fichier contenant l'enregistrement des mesures de l'essai de densité de... ..	106
Figure 6.12 : OpenFileDialog pour sélection d'un fichier data	107
Figure 6.13 : Feuille Excel avec les datas	109
Figure 6.14 : datas misent en forme	111
Figure 6.15 : Page3 de la Userform5 pour les essais de corrosivités.....	112
Figure 6.15 : Userform pour la saisie des résultats de propagation d'incendie	115
Figure 6.17 : Page5 de la Userform5 pour la saisie des résultats de résistance aux... ..	116
Figure 6.18 : Page5 de la Userform5 pour la saisie des résultats d'Indice d'oxygène.....	117
Figure 6.19 : Page1 de la Userform5 pour les résultats des essais de corrosivités	118
Figure 6.20 : Page2 de la Userform5 pour les résultats des essais d'Indice d'oxygène.....	119
Figure 6.21 : Userform12 pour entrer le nom du ou des opérateurs	120
Figure 6.22 : Première partie du programme	123
Figure 6.23 : Partie réservée à la construction du câble.....	125
Figure 6.24 : Mise forme des résultats pour l'essai de propagation de flamme.....	126
Figure 6.25 : mise en forme des résultats pour l'essai de densité de fumées.....	127
Figure 6.26 : mise en forme des résultats de mesures de %HCl, pH et conductivité.....	128
Figure 6.27 : mise en forme des résultats de propagation d'incendie	128
Figure 6.28 : mise en forme des résultats de résistance à l'incendie	128
Figure 6.29 : mise en forme de la mesure de l'indice d'oxygène	128
Figure 6.30 : Mise en forme normalisé de la feuille de résultats	129

TABLE DES TABLEAUX

Chapitre 3 : Phénomènes de la Combustion.....	26
Tableau 3.1 : Limites d'inflammabilités de quelques gaz courants [29].....	26
Tableau 3.2 : Températures d'auto-inflammation de quelques gaz courants [29].....	27
Tableau 3.3 : Point éclair de quelques liquides [29].....	27
Tableau 3.4 : Températures d'inflammations de quelques solides [29].....	27
Tableau 3.5 : Formulation de polymères avec retardateurs de flammes [31].....	38
Chapitre 4 : Mise en Service du Laboratoire d'Essais Incendie	44
Tableau 4.1 : Durée d'exposition du câble à la flamme de 1 kW [35].....	47
Tableau 4.2 : Nombre de tronçons de câbles pour l'échantillon [40].....	50
Tableau 4.3 : Définition des conditions d'essais suivant les catégories de câbles... ..	58
Tableau 4.4 : Essais de répétabilité de la densité de fumées du Toluène à 10%.....	71
Tableau 4.5 : Essai de reproductibilité de la densité de fumées du Toluène à 10%	71
Tableau 4.6 : Essais de répétabilité de la densité de fumées sur câble	72
Tableau 4.7 : Essai de reproductibilité de la densité de fumées sur câble	73
Tableau 4.5 : Essais de répétabilité du test IEC 60332-1	74
Tableau 4.6 : Essai de reproductibilité du test IEC 60332-1.....	75
Chapitre 5 : Comparaisons des Comportements de Combustions des Câbles NEXANS	79
Tableau 5.1 : Essais de propagation de flamme sur câbles LAN.....	88
Tableau 5.2 : Essais de densité de fumées sur câbles LAN	89
Tableau 6.3 : Mesure de la quantité d'HCl émise par la combustion de la gaine... ..	89

NOMENCLATURE

Lettres latines

<i>a</i>	<i>Activité de l'espèce considérée</i>
<i>Br</i>	<i>Nombre de Brinkman adimensionnelle</i>
<i>C</i>	<i>Capacité en Coulomb/Volt ou Farad F</i>
<i>CVM</i>	<i>Chlorure de vinyle monomère</i>
<i>I</i>	<i>Intensité du courant en Ampère</i>
<i>IO</i>	<i>Indice d'oxygène</i>
<i>K_p(T)</i>	<i>Constante d'équilibre à pression constante</i>
<i>LC₅₀</i>	<i>Indice de concentration létale en %</i>
<i>PE</i>	<i>Polyéthylène</i>
<i>PE-BDR</i>	<i>Polyéthylène basse densité radicalaire</i>
<i>PE-BDL</i>	<i>Polyéthylène basse densité linéaire</i>
<i>PE-HD</i>	<i>Polyéthylène haute densité</i>
<i>PE-R</i>	<i>Polyéthylène réticulé</i>
<i>PP</i>	<i>Polypropylène</i>
<i>PVC</i>	<i>Polychlorure de vinyle</i>
<i>Q</i>	<i>Quantité d'électricité en Coulomb</i>
<i>Q_C^{''}</i>	<i>Débit massique de combustion en kg. s⁻¹</i>
<i>Q_P^{''}</i>	<i>Débit massique de pyrolyse en kg. s⁻¹</i>
<i>R</i>	<i>Résistance du matériau en Ohm : Ω</i>
<i>r</i>	<i>Résistivité en Ω.m²/m, Ω.m ou en μΩ.cm pour les métaux</i>
<i>T</i>	<i>Température en °C ou K</i>
<i>v</i>	<i>Vitesse linéaire en m.s⁻¹</i>
<i>W</i>	<i>Puissance de l'effet Joule en Watt</i>
<i>V</i>	<i>Différence de potentielle en Volt</i>

Lettres grecques

<i>Δ</i>	<i>Chaleur, source d'énergie</i>
<i>ΔH</i>	<i>Variation d'enthalpie en kJ/mol ou J/mol...</i>
<i>η</i>	<i>Viscosité en Pa.s</i>
<i>λ</i>	<i>Conductivité thermique W.m⁻¹.°C⁻¹</i>
<i>ε</i>	<i>Déformation rationnelle adimensionnelle</i>
<i>ε₀</i>	<i>Permittivité ou constante diélectrique du vide 8,854187.10⁻¹² A.s.V⁻¹.m⁻¹</i>
<i>ε_A</i>	<i>Permittivité ou constante diélectrique absolue A.s.V⁻¹.m⁻¹</i>
<i>ε_r</i>	<i>Permittivité relative ou constante diélectrique relative adimensionnelle</i>
<i>τ_{inf}</i>	<i>Délais d'inflammation en seconde</i>

Si un symbole n'est pas défini dans cette liste, il l'est lors de sa première utilisation.

INTRODUCTION

Le monde d'aujourd'hui est envahi par différents flux d'énergies et d'informations. Le transport de ces flux implique l'utilisation de câbles conducteurs. Les câbles sont des objets qui font partie de notre quotidien. D'apparence banale, ils sont en réalité intimement liés aux progrès technologiques. En effet, utilisés depuis plus d'un siècle pour le transport d'énergie électrique, chaque innovation électrique, électronique, magnétique ou de télécommunication est bénéfique grâce à la construction de nouveaux câbles. Le groupe NEXANS est le leader mondial dans le secteur des câbles. Un premier chapitre présentera l'entreprise d'un point de vue mondial et la filiale de Tuzla en TURQUIE.

Un câble c'est avant tout un produit destiné aux transports d'énergies ou de signaux. Tout câble est composé d'un élément conducteur et d'un revêtement isolant. Les conducteurs d'énergie sont majoritairement le cuivre, l'aluminium et leurs alliages respectifs. Le transport de signaux peut se faire par du cuivre ou de la fibre optique (respectivement des signaux électriques et lumineux). Pour isoler électriquement le conducteur, des polymères sont utilisés, ce sont des formulations de polychlorure de vinyle, de polyéthylène ou de polypropylène.

Le chapitre 2 est dédié aux lignes d'extrusion en câblerie. Ainsi, les câbles seront détaillés depuis les matières premières jusqu'aux produits finis. On peut distinguer les câbles industriels (gros diamètre, par exemple dans l'industrie ferroviaire) et les câbles de transferts de données (diamètre fin, par exemple les connecteurs USB). Chez NEXANS TÜRKIYE, le métal utilisé est majoritairement le cuivre, seul ses dimensions varient. Les polymères, qui enrobent le cuivre, varient suivant les applications et le cahier des charges.

Le revêtement plastique des câbles leur donne un caractère inflammable, c'est ce point qui fera l'objet du mémoire. Le chapitre 3 sera consacré à la combustion des plastiques et à la présentation des essais standards IEC pour câbles. La société basée à Tuzla s'est équipée en 2009 d'un nouveau laboratoire qui mesure les propriétés adoptées par les câbles en présence d'incendie (déformation, vitesse de propagation de flamme, composition des fumées...). Le but du mémoire est de mettre en service ce laboratoire de qualité-contrôle. Le chapitre 4 présentera les aménagements réalisés pour permettre les essais sur les matériaux et les câbles suivant les normes IEC. Le chapitre 5 présentera les résultats expérimentaux obtenus lors de quelques essais. Ces essais illustreront le comportement des échantillons de câbles soumis au feu.

Le dernier chapitre sera dédié à la présentation du programme VBA qui a pour but de créer une base de données des essais réalisés. Ce chapitre présentera les objectifs, les attentes et la construction du programme.

CHAPITRE 1 : LE GROUPE NEXANS

Ce premier chapitre est dédié à la présentation du Groupe. Le secteur d'activité et l'environnement de travail seront présentés. Toute cette partie sera alimentée par le site internet [1] et la brochure [2]. Le stage se déroule sur le site de Tuzla en périphérie d'Istanbul, l'environnement de travail ainsi que la configuration générale du stage est présentée dans ce chapitre.

I. Présentation générale du groupe

I.1) Histoire

En 1897, la Société Française des câbles électriques est créée à Lyon. Depuis sa création la société n'a pas cessé de grandir pour devenir Nexans en 2000.



Figure 1.1 : Logo du groupe Nexans [3]

I.2) Secteur d'activité

Avec plus de 100 ans d'activité, Nexans est un leader mondial dans l'industrie du câble. La société inscrit l'énergie au cœur de son développement, sa production alimente, entre autres, les marchés d'infrastructure, de l'industrie, du bâtiment et des réseaux de transmissions de données.

I.3) Chiffre d'affaire et effectifs

Coté sur NYSE Euronext Paris compartiment A, Nexans a réalisé en 2008 un chiffre d'affaires de 6,8 milliards d'euros. Le groupe emploie 22 400 personnes dans ses sites industriels présents dans 39 pays et ses activités commerciales qui s'étendent dans le monde entier. La figure 1.2 est un planisphère avec les filiales Nexans en rouge.

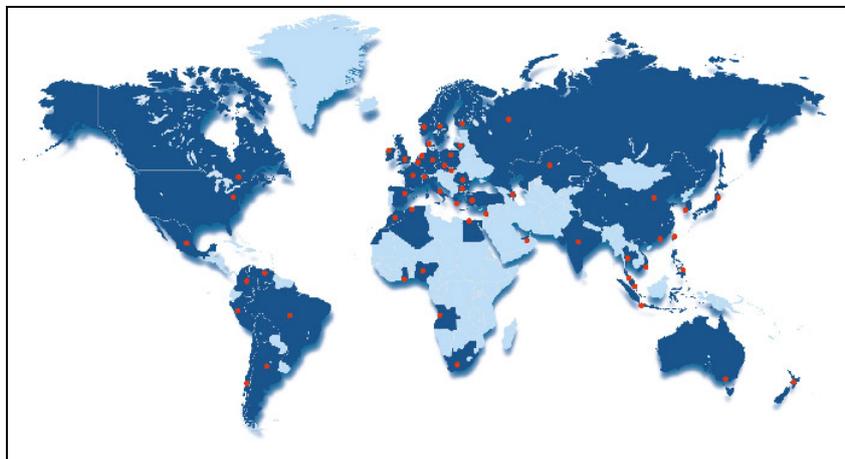


Figure 1.2 : Planisphère des filiales du groupe Nexans [4]

II. Les quelques chantiers phares

Les marchés dans lesquels se trouve Nexans sont les suivants :

- Industries Aérospatiales et Militaires
- Aéroports
- Automatismes
- Automobile
- Bâtiment
- Manutention
- Nucléaire
- Pétrole, Gaz et pétrochimie
- Réseaux d'énergie
- Réseaux ferroviaires
- Équipements ferroviaires
- Construction navale et Marine
- Réseaux de télécommunication
- Fermes d'éoliennes
- Eoliennes

Dans la suite quelques exemples illustrent la présence de Nexans sur les différents secteurs d'activités.

II.1) Câbles sous marin



Figure 1.3 : Navire câblé du groupe « le C/S NEXANS SKAGGERAK » [5]

Avec ses 580 kilomètres de long, le câble sous marin reliant la Norvège et les Pays Bas est le plus grand au monde. Il a été posé par le navire câblé du Groupe, le C/S Nexans Skagerrak. Ce même navire posa en 2009 un autre câble sous marin entre la Suède et la Finlande.

II.2) Réseaux ferroviaires



Figure 1.4 : Train à grande vitesse chinois [6]

Nexans intensifie sa production sur son site de Shanghai, pour suivre le développement des trains à grande vitesse en Chine. Les câbles d'énergies et contrôle-commande sont les produits destinés à ce marché. Parallèlement, Nexans participe au développement du Métro à Istanbul, Séoul et Sao Paulo.

II.3) Automobile

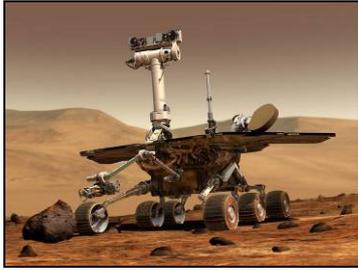


Figure 1.5 : Robot de la NASA [7]

Nexans propose de nouveaux câbles d'énergies développés pour les véhicules hybrides modernes. De plus, les câbles de commandes des robots envoyés sur Mars ont été fournis par Nexans.

II.4) Bâtiment



Figure 1.6 : Stade Olympique de Pékin [8]

Nexans a équipé le parking du stade Olympique « nid d'hirondelle » de Pékin en câbles de chauffage direct.

III. Présentation de la filiale en Turquie

Nexans possède deux sites de production en Turquie. Ils ont été créés en 1968, le premier est situé à Denizli en Anatolie et le second à Tuzla (périphérie d'Istanbul, Anatolie). C'est à Tuzla que s'est déroulé le stage.

La société emploie environ 500 personnes en Turquie et possède en plus de ses deux sites industriels, deux centres logistiques et sept offices de ventes.

La figure 1.7 illustre la présence de Nexans en Turquie.



Figure 1.7 : Implantations de Nexans en Turquie [document interne]

III.1) Site de Tuzla

Le site de production de Tuzla emploie une centaine de personnes. L'usine est séparée en deux parties, d'un coté elle produit les câbles réservés au transport d'énergie (câble maritime, ferroviaire,...), et de l'autre coté les câbles réservés au transport de données (Ethernet...). La production ne s'arrête jamais (7/7 et 24/24).

III.2) Les laboratoires de Tuzla

Le site de Tuzla est équipé d'un laboratoire de qualité contrôle où des essais sont réalisés sur les matières premières et les produits finis. En 2009, le site a investi plus de deux cents milles euros pour s'équiper d'un laboratoire de test à incendie. Ce dernier est encore inactif au début du stage.

III.3) Configuration du stage

Equipé d'un nouveau laboratoire d'essais à incendie depuis le printemps 2009, l'entreprise de Tuzla veut mettre en service ce nouveau laboratoire du service qualité-contrôle. Pour ce faire, une collaboration avec le site de Denizli et les laboratoires du NRC (Nexans Research Center à Lyon) est entamée. La venue de Sultan KÖŞEOĞLU, ingénieure chimiste à Denizli, experte dans le domaine, lance le début de la mise en service. Dans ce nouveau laboratoire, les essais doivent être réalisés suivant les normes internationales et les exigences du NRC. Après un état des lieux du laboratoire et quelques modifications, une des préoccupations du service est la formation du personnel aux essais. Aujourd'hui, le site de Tuzla ne possède qu'un operateur destiné aux contrôles physico-chimique des matières premières, ce qui est insuffisant aux vues du dimensionnement du laboratoire et des essais qui devront être réalisés. Afin d'obtenir une base de données avec les résultats des essais, une programme en langage VBA est créé.

IV. Conclusion

Le groupe NEXANS est une multinationale présente depuis plus d'un siècle et dont l'activité est l'industrie du câble. Pour augmenter le contrôle de la qualité de ses produits, la filiale de Tuzla s'est équipée d'un laboratoire d'essais incendie. Le sujet du mémoire sera la mise en service au sens large de ce laboratoire (l'installation des appareils, raccordements, étalonnages, formation des techniciens...) et la rédaction d'un programme informatique qui permet d'archiver les résultats.

CHAPITRE 2 : FABRICATIONS DES CÂBLES

Les matériaux utilisés pour la fabrication des câbles sont un métal conducteur et un enrobage isolant. Ce chapitre montre comment les câbles sont fabriqués à partir de ces matières premières. Le procédé de mise en forme du métal ainsi que celui du polymère sont présentés dans ce chapitre. Les différents éléments du contrôle de la production des câbles sont présentés dans cette partie.

I. Schéma de fabrication générale et aperçu de quelques câbles

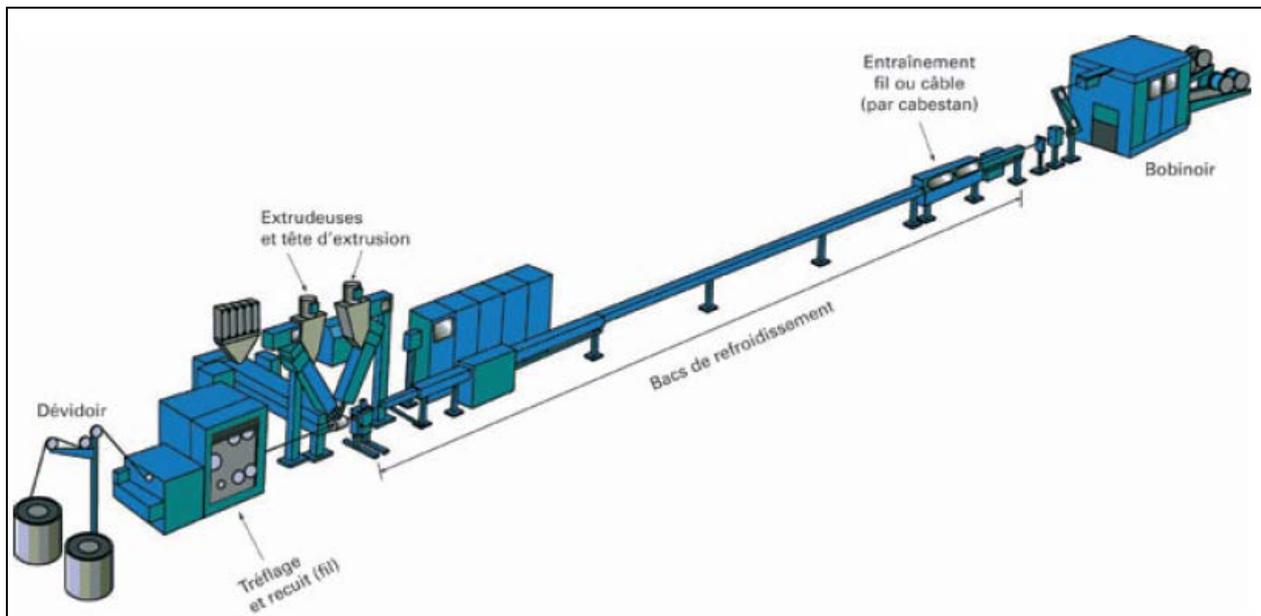


Figure 2.1 : Ligne générale de fabrication des câbles [10]

La figure 2.1 illustre le schéma général de fabrication d'un fil conducteur élémentaire. Ce fil est composé du corps conducteur appelé aussi « âme » et de l'isolant. L'alimentation se fait au niveau des dévidoirs où sont placés les fils machines. Dans une première zone le métal est mis en forme par tréfilage et recuit. L'extrusion permet ensuite d'isoler électriquement le conducteur. L'isolant étant chaud, le fil passe dans un long bac de refroidissement. Le fil arrive enfin dans un bobinoir où il est conditionné [10 ; 11].

Pour obtenir un câble le plus simple possible, les fils élémentaires fabriqués suivant la figure 2.1 sont rassemblés puis gainés par extrusion. Les polymères sont très généralement le PVC, le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) [10]. Cependant, un câble est rarement composé seulement de plusieurs fils élémentaires gainés, très souvent d'autres éléments comme les bandes de mica, le rembourrage, les bandes d'aluminium/copolymères, les écrans métalliques, les armures... entrent dans la construction du câble [10 ; 11 ; 12].

D'après [10] les câbles peuvent être classés en trois familles :

- Les câbles de télécommunications avec âme conductrice (signaux électriques).
- Les câbles de télécommunications avec fibres optiques (signaux optiques).
- Les câbles de transmissions d'énergies électriques.

Le site de Tuzla ne produit pas de câbles à fibres optiques. Des exemples des câbles produits sur le site seront présentés.

I.1) Câbles de télécommunications avec âme conductrice métallique

L'usage de ces câbles est destiné à la téléphonie, aux réseaux locaux : LAN (*Local Area Network*) et à la télévision : câble coaxial CATV (*Co Axial Tele Vison*). Les câbles de télécommunications sont composés d'une âme en cuivre massif isolé par du PE, PE cellulaire (expansé), PP ou du PVC. Des blindages métalliques peuvent être utilisés [10].

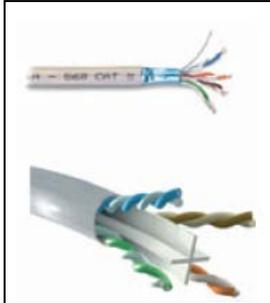


Figure 2.2 : Câble LAN [10]



Figure 2.3 : Câble coaxial [10]

La figure 2.2 montre deux types de câble LAN, en haut le câble est blindé avec un ruban métallique, il est de type STP (*Shielded Twisted Pair*), c'est-à-dire à blindage métallique sous gaine. Le câble du bas n'a pas de blindage, il est de type UTP (*Unshielded Twisted Pair*), la présence du cross-member au centre du câble sépare les paires et évite les interférences entre paires. Leurs vitesses maximales de production sont de $2,5 \text{ km.min}^{-1}$ [10].

La figure 2.3 montre les câbles coaxiaux. Ils possèdent une structure avec l'âme en cuivre massif au centre, une mousse isolante et un blindage métallique à l'extérieur. L'isolation est en PE expansé et la gaine généralement en PE. La production est généralement de 6 m.min^{-1} .

I.2) Câbles de transmissions d'énergies électriques

L'usage de ces câbles est destiné à transporter de l'énergie électrique. Les câbles sont de type basse-tension jusqu'à 1 kV, moyenne tension jusqu'à 35 kV et haute tension jusqu'à 500 kV. L'âme est en cuivre ou en aluminium, elle peut être de type massif ou toronné. Les polymères utilisés sont du PVC, du PE, du PP et du PE réticulé. L'isolation est généralement en PE réticulé [10 ; 11].

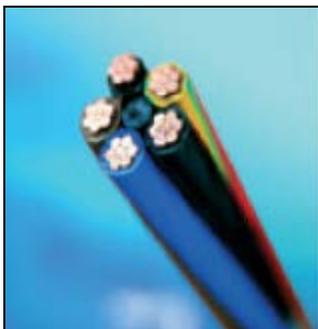


Figure 2.4 : Câble basse tension <1kV [10]

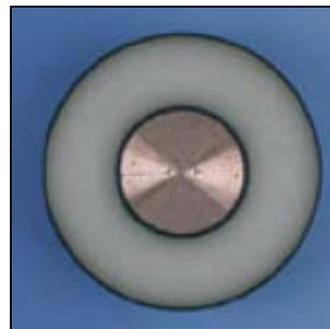


Figure 2.5 : Câble d'énergie jusqu'à 500 kV [10]

La figure 2.4 montre un type de câble basse tension. L'âme est en cuivre massif ou toronné (massif assemblé comme sur la figure 2.4). Pour certains câbles, l'âme peut être flexible, ceci implique l'utilisation de plusieurs fils de diamètres très fins.

La figure 2.5 montre la section d'un câble pour énergie haute tension. L'âme est en cuivre ou aluminium. La figure montre une isolation en trois couches, une couche de PE semi conducteur chargé en noir de carbone, une couche de PE réticulé et enfin une autre couche de PE semi conducteur.

La vitesse de production maximum est de 1,2 km.min⁻¹ pour les câbles basses tensions. La production des câbles d'énergie se fait à quelques m.min⁻¹ et n'excède pas 35 m.min⁻¹.

II. Mise en forme des métaux : tréfilage, recuit et assemblage des fils élémentaires

II.1) Le tréfilage des métaux

Le conducteur métallique en cuivre ou aluminium arrive sous forme de fil machine. Le diamètre du fil machine est autour de 8 mm pour le cuivre et jusqu'à 20 mm pour l'aluminium. L'étape de tréfilage vise à diminuer le diamètre du conducteur grâce à l'utilisation des filières. Les articles [13], [14] et [15] détaillent le tréfilage des métaux.

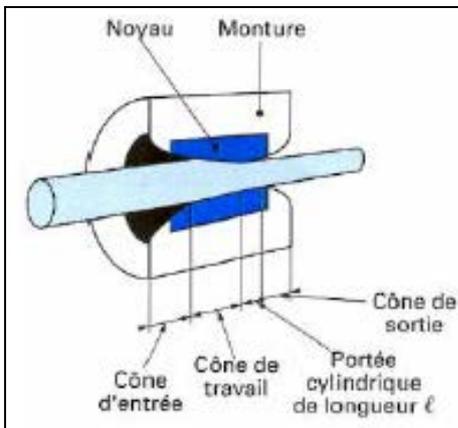


Figure 2.6 : Passage du fil dans la filière [13]

La figure 2.6 montre le tréfilage d'un fil métallique. La filière est composée d'un noyau positionné sur une monture. Le noyau dur est la pièce essentielle au tréfilage, il est en carbure de tungstène ou en diamant. La monture est généralement en acier.

Durant l'opération de tréfilage les forces de frottements sont élevées. L'emploi d'un lubrifiant sous forme d'émulsion diminue ces frottements. De plus, l'émulsion évite l'échauffement excessif du fil [11 ; 13 ; 14 ; 15].

Le **taux d'écouissage** ou **degré d'écouissage** est la réduction relative de la section du fil. Soit « S » la section initiale (avant tréfilage), « s » la section finale (après tréfilage), « L₀ » la longueur initiale (correspondant à S) et « L » la longueur finale (correspondant à s).

- Réduction de section en pourcentage

$$\frac{S - s}{S} \times 100 = \left(1 - \frac{s}{S}\right) \times 100$$

- Allongement par tréfilage en pourcentage

$$\frac{S - s}{s} \times 100 = \left(\frac{S}{s} - 1\right) \times 100$$

- Déformation rationnelle

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{S}{s}$$

Le tréfilage est réalisé en continu avec une succession de plusieurs filières, après chaque passage le taux d'écroissage est de l'ordre de 30% [11 ; 13 ; 14 ; 15]. La diminution de la section implique l'augmentation de la longueur, ce qui induit l'augmentation de la vitesse. Pour remédier à l'augmentation de la vitesse, trois techniques sont utilisées :

- **Machines continues ou à passage direct**
- **Machines à accumulation**
- **Machines à glissement**

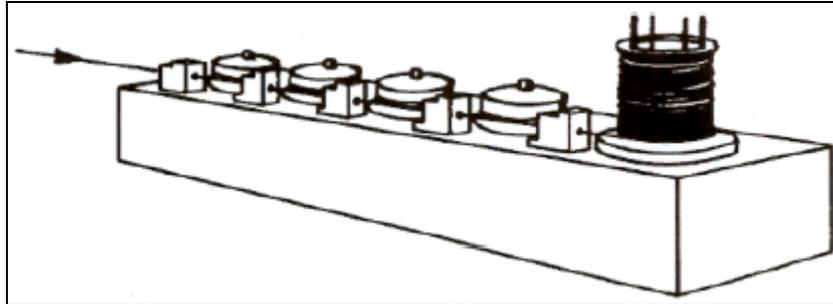


Figure 2.7 : Machine de tréfilage continue [13]

Dans la machine continue présentée en figure 2.7, les vitesses de chaque bobine après les filières sont automatiquement équilibrées pour que le débit soit suffisant pour le passage dans la filière suivante. Plusieurs tours sur chaque bobine permettent au fil de refroidir [13 ; 14 ; 15].

Dans la machine à accumulation il n'y a pas d'équilibrage automatique des vitesses. Le débit à chaque filière est calculé pour offrir un excès de fil pour la passe suivante. L'excès de fil donne l'accumulation qui permet de refroidir le fil et de ne pas interrompre la production.

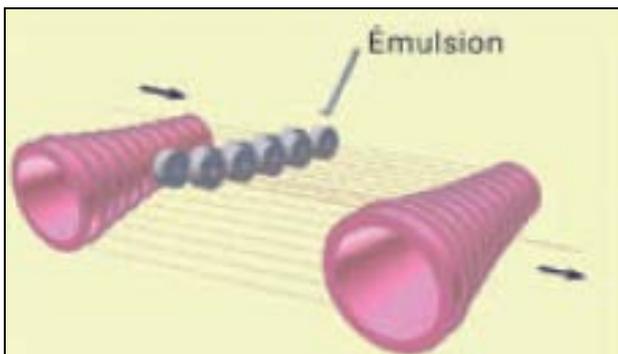


Figure 2.8 : Machine à glissement [14]

Le procédé de tréfilage à glissement est le plus utilisé, car il demande l'investissement le moins élevé.

En sortie de tréfilage les fils de cuivre ont un diamètre moyen de 0,25 mm pour les utilisations les plus courantes. Des fils ultras fins avec un diamètre de l'ordre de 0,012 mm peuvent être obtenus [14]. Pour l'aluminium les fils obtenus sont de l'ordre de 0,15 mm de diamètre [15].

Une fois tréfilés, les fils suivent un traitement thermique appelé **le recuit**.

II.2) Recuit du fil tréfilé

Durant le tréfilage, le fil subit un écrouissage important qui modifie ses propriétés mécaniques. Le recuit est réalisé pour que le conducteur retrouve ses propriétés d'élongation [11]. En cas de ligne en tandem (tréfilage + isolation), le recuit sert aussi à préchauffer le fil pour offrir une meilleure adhérence à l'isolant [11].

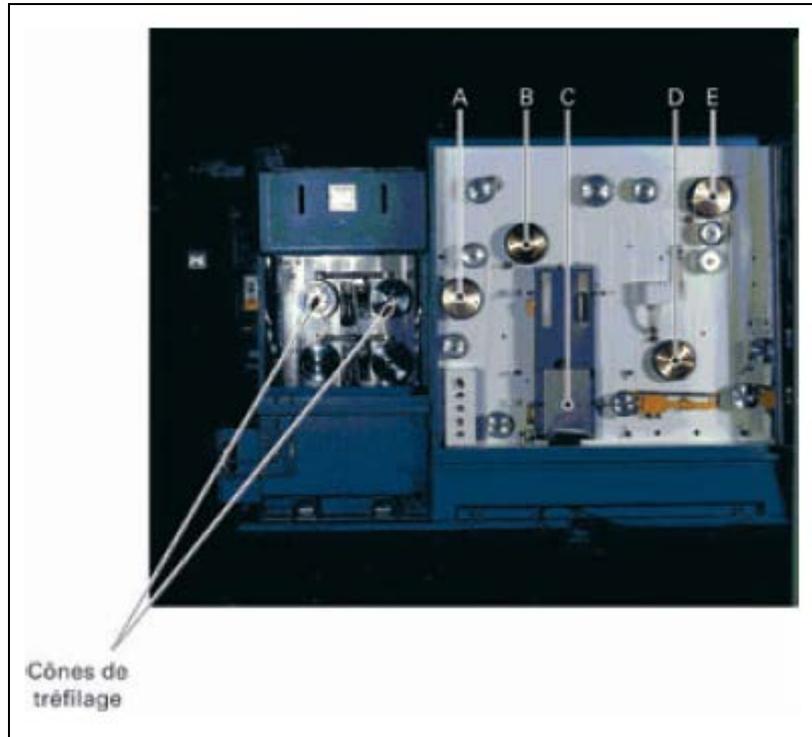


Figure 2.9 : Tréfilage et recuit du fil [11]

La figure 2.9 montre le dispositif de recuit par effet joule. Lorsque le fil se trouve entre les poulies conductrices A (à la terre) et B (sous tension), il est traversé par un courant électrique qui le préchauffe à 180°C. Entre la poulie B et la poulie C (non visible sur la figure et reliée à la terre), le fil est chauffé à 600°C sous azote pour éviter l'oxydation. Le fil est ensuite refroidi dans l'eau juste après C. Le préchauffage à 100°C avant isolation est réalisé durant le passage entre les poulies D et E.

II.3) Assemblage des fils élémentaires

L'âme du conducteur a des propriétés mécaniques de flexibilité qui varient suivant sa construction. Des classes de flexibilité sont instaurées dans la norme IEC60228 [16]. Cette norme dicte le nombre de fils élémentaires pour obtenir la section de l'âme du câble suivant la classe désirée :

- Classe 1 : âme solide
- Classe 2 : âme toronné ou toronné puis compacté
- Classe 5 : âme flexible
- Classe 6 : âme plus flexible que la classe 5

Les métaux utilisés sont du cuivre (nu ou revêtu d'un métal recuit) et de l'aluminium (seul ou en alliage). Le conducteur en aluminium doit offrir des propriétés mécaniques de résistance à la traction conformes à la norme (suivant la section du conducteur et sa classe) [16].

Les conducteurs massifs, qui appartiennent à la Classe 1, sont composés d'un fil élémentaire dont la section est au maximum de 25 mm² pour le cuivre. Pour l'aluminium la section du fil élémentaire est comprise entre 10 et 35 mm² [16].

Les conducteurs de la Classe 2 sont toronnés et/ou compactés et/ou mis en forme.



Figure 2.10 : Câble avec âme toronnée de classe 2 [17]



Figure 2.11 : Câbles avec âmes toronnées et compactées de classe 2 [18]

Comme présenté sur la figure 2.10, les conducteurs toronnés ont des fils élémentaires de sections identiques. Les fils élémentaires d'aluminium ne doivent pas avoir une section inférieure à 10 mm² [16].

Pour les conducteurs toronnés et compactés illustrés en figure 2.11, les fils élémentaires d'aluminium doivent, cette fois encore, avoir une section supérieure à 10 mm². Les fils élémentaires peuvent avoir des sections différentes tout en ayant toujours des rapports de proportions inférieurs à 2 [16].

Pour les conducteurs toronnés et mis en forme (non-circulaire), les fils élémentaires doivent avoir une section supérieure à 25 mm². Les fils élémentaires peuvent avoir des sections différentes tout en ayant toujours des rapports de proportions inférieures à 2 [16].

Le nombre de fils élémentaires pour la classe 2 est donné en Annexe B.1 par le tableau 1. Comme le montre ce tableau, au dessus de 1000 mm², la norme ne dicte plus le nombre de fils élémentaires. Pour ces applications marginales, les conducteurs sont construits à partir de quatre, cinq ou six conducteurs toronnés.



Figure 2.12 : Âme flexible [19]

Les conducteurs flexibles des classes 5 et 6 sont en cuivre ou en alliage de cuivre. Tous les fils élémentaires ont la même section. La section maximum des fils élémentaires est donnée en Annexe B.1 dans le tableau 2.

La figure 2.12 montre un câble avec un conducteur flexible de catégories 5 ou 6. Le nombre élevé de fils élémentaires permet la flexibilité.

III. Mise en forme des polymères : l'extrusion

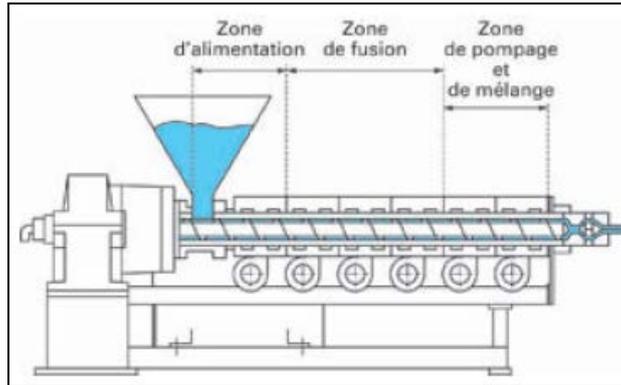


Figure 2.13 : Procédé d'extrusion [11]

L'extrusion est le procédé utilisé pour isoler les fils élémentaires et gainer les conducteurs. La figure 2.13 illustre le procédé d'extrusion, l'extrudeuse est alimentée en polymères granulés, colorants et divers additifs. La vis et le fourreau d'extrusion fondent les granulés et mélangent le système pour obtenir une pâte homogène. Par l'action continue de la vis, la pâte est mise sous pression. La filière utilisée est de forme annulaire [11].

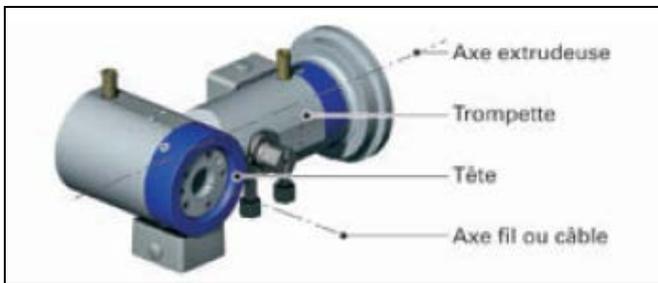


Figure 2.14 : Tête pour l'extrusion des câbles [11]



Figure 2.15 : Distributeur à canal de répartitions [11]

La figure 2.14 montre la tête d'extrusion utilisée lors de l'opération. L'axe de l'extrusion est perpendiculaire à l'axe du fil ou du câble. Le corps qui relie la tête d'extrusion à l'extrudeuse est appelé trompette. Ce nom est lié à son diamètre qui diminue en allant de l'extrudeuse à la tête d'extrusion [11].

Un distributeur illustré en figure 2.15 est placé dans la tête d'extrusion et provoque l'écoulement annulaire [11]. La distribution se fait suivant la figure 2.16.

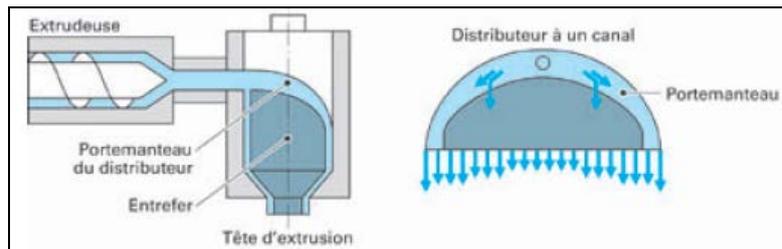


Figure 2.16 : Répartition et écoulement dans la tête d'extrusion [11]

Comme le montre la figure 2.16, le plastique fondu arrive dans le distributeur par la partie appelée portemanteau. Durant l'étape de distribution, la répartition de la matière doit être régulière pour ne pas pénaliser l'excentricité et l'ovalité du produit [11].

La dernière partie de la tête d'extrusion est l'outillage. L'outillage sert à finaliser l'extrusion [11].

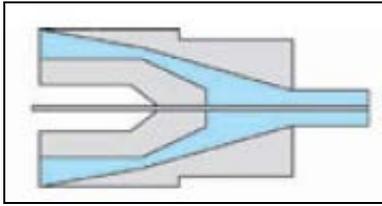


Figure 2.17 : Outillage pression [11]

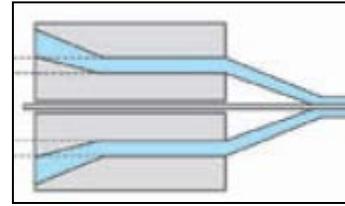


Figure 2.18 : Outillage tube [11]

La figure 2.17 montre l'outillage pression. Le conducteur électrique est en contact direct avec le polymère, cet outillage convient donc plus généralement pour l'isolation de l'âme du câble. La pression élevée fait adhérer la matière sur le conducteur [11].

La figure 2.18 illustre l'outillage tube. Ce procédé est plus généralement utilisé pour le gainage des conducteurs. L'outillage tube permet d'obtenir une épaisseur du polymère plus constante. Une dépression sous le cône est nécessaire, pour adhérer le plastique du gainage à ce qu'il recouvre (isolant, armure...) [11].

L'extrusion est aussi utilisée comme réacteur chimique en continu. En effet, l'extrudeuse est utilisée pour les réactions de réticulation et de moussage, ce qui introduit le terme d'**extrusion réactive**. En plus des phénomènes thermomécaniques propres à l'extrusion, des réactions chimiques sont volontairement induites lors de l'extrusion réactive [11 ; 20].

III.1) L'extrusion réactive : Réticulation

La réticulation fait intervenir une réaction chimique durant le procédé d'extrusion qui crée des liaisons entre les molécules. Les PE réticulés, noté PE-R, sont obtenus à partir du PE linéaire (PE-L) grâce à un initiateur.

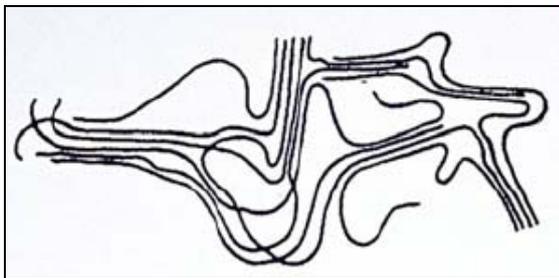


Figure 2.19 : Structure moléculaire du PE-L [21]

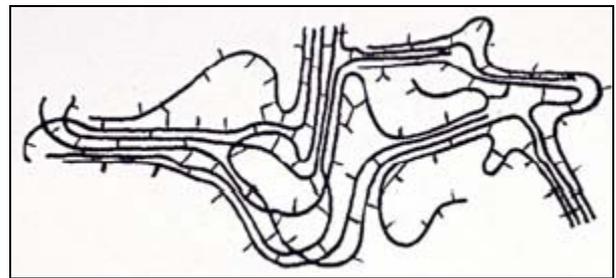


Figure 2.20 : Structure moléculaire du PE-R [21]

Les figures 2.19 et 2.20 montrent respectivement les structures moléculaires des PE-L et PE-R. Les liaisons qui se créent sont irréversibles et font perdre au PE son caractère thermoplastique, le PE-R est un thermodurcissable [22]. Grâce à ses liaisons covalentes intramoléculaires, le PE-R offre de meilleures propriétés mécaniques à hautes températures. L'utilisation de PE-R est surtout utile pour l'isolation des câbles à énergie électrique [11].

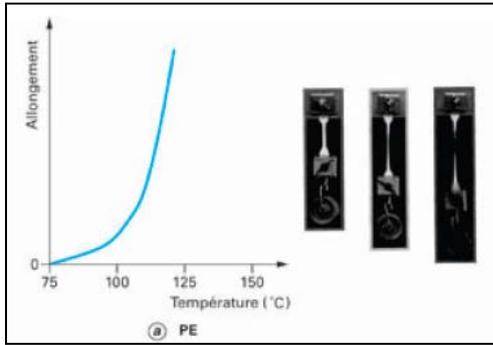


Figure 2.21 : Résistance du PE à la température [11]

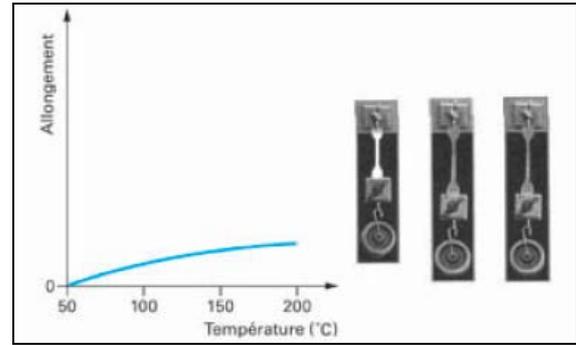


Figure 2.22 : Résistance du PE-R à la température [11]

Les figures 2.21 et 2.22 montrent que le PE-R est beaucoup plus résistant à la chaleur que le PE. D'après ces essais, le PE-R ne s'allonge presque pas entre 150°C et 200°C, alors que le PE se déforme beaucoup à partir de 100°C et rompt à 125°C [11].

Trois technologies sont utilisées pour réaliser le PE-R :

- Procédé aux peroxydes.
- Procédé aux silanes.
- Procédé d'irradiation par rayons ionisants.

Dans les trois cas le but est de créer des sites actifs sur la chaîne du polymère pour faire apparaître des liaisons [11].

a) Procédé aux peroxydes

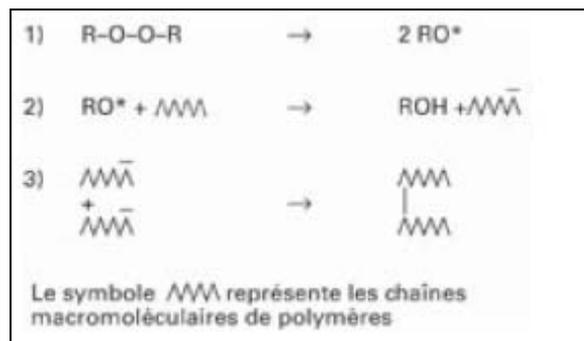


Figure 2.23 : Principe de réticulation aux peroxydes [11]

La figure 2.23 montre le mécanisme de réticulation à l'aide des peroxydes. Dans un premier temps les peroxydes se décomposent et forment des groupements réactifs. Les groupements réactifs arrachent des hydrogènes à la chaîne carbonée, les chaînes de polymères sont alors activées. Deux chaînes de polymères peuvent alors se lier. Le type de peroxydes et les paramètres d'extrusion sont importants, la réticulation donne un thermodurcissable, si elle avait lieu au sein de l'extrudeuse, elle provoquerait le blocage de cette dernière. Pour éviter cela, la température au sein de la tête d'extrusion ne doit pas dépasser 136°C, elle est régulée par un fluide caloporteur (huile). Le PE et les peroxydes doivent former une pâte homogène et éviter toute stagnation dans le fourreau, les temps de séjour doivent être courts. La longueur de la vis est environ de 24 fois le diamètre de la vis [11].

La réticulation a lieu dans des fours tubulaires chauffés autour de 200°C avec des maximums de 530°C dans les premières zones. Le four est sous pression pour éviter les

bulles qui apparaissent suite aux réactions de réticulation. Ces fours sont positionnés verticalement ou horizontalement, leurs longueurs peuvent atteindre 100 mètres [11].

b) Procédés aux silanes

Une étape de greffage d'un groupe silane sur le polymère est réalisée avant la réticulation. Les procédés peuvent être en une étape, en deux étapes ou avec un greffage ultérieur du silane (copolymérisation durant la synthèse du PE) [11 ; 23]. Dans tous les cas la réticulation ne doit pas avoir lieu dans l'extrudeuse au risque de la bloquer [11].

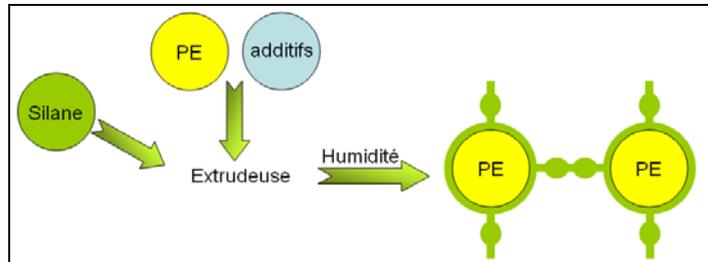


Figure 2.24 : Réticulation aux silanes en une étape [23]

La figure 2.24 montre le schéma général de la réticulation en une étape. Durant ce procédé le greffage est effectué durant la mise en forme dans l'extrudeuse. Le PE est introduit dans la trémie avec le silane, les peroxydes et les catalyseurs. La réticulation est obtenue par étuvage humide à haute température [11].

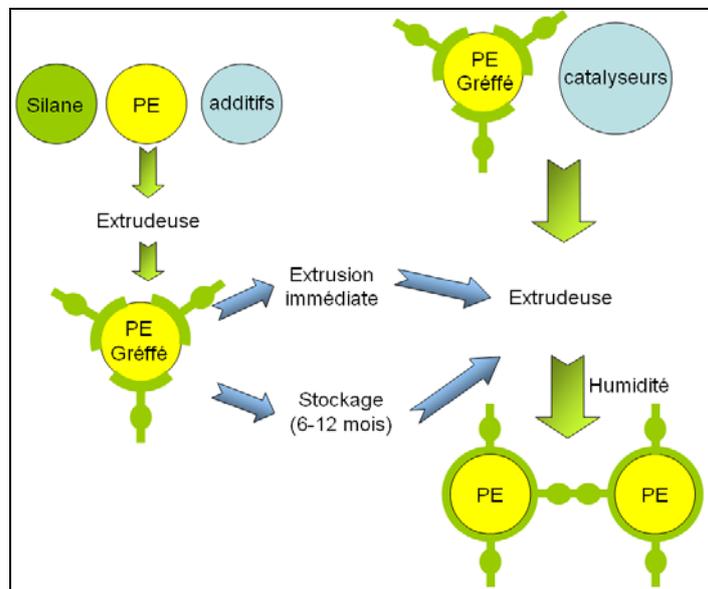


Figure 2.25 : Réticulation aux silanes en deux étapes [23]

La figure 2.25 illustre le procédé en deux étapes. Les silanes sont greffés lors d'une première étape d'extrusion. Le PE greffé obtenu est sous forme de granulés, il peut alors être stocké pendant 6 à 12 mois. La matière peut alors être mise en forme lors de l'extrusion chez le câbleur. La réticulation est obtenue par étuvage humide à haute température [11 ; 23].

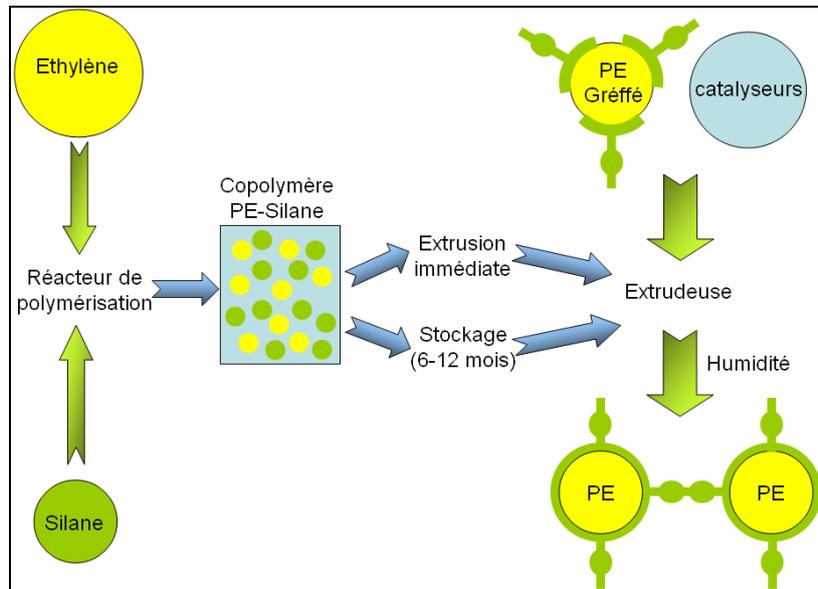


Figure 2.26 : Procédé en copolymérisation de l'éthylène avec le silane [23]

La figure 2.26 montre les étapes du procédé en copolymérisation de l'éthylène. Les silanes sont greffés sur le PE dans les réacteurs de polymérisation. Le granulé obtenu peut être stocké de 6 à 12 mois. Le câbleur utilise les PE greffés avec un catalyseur qui initiera la réticulation en présence d'eau. La réticulation est obtenue par étuvage humide à haute température [11 ; 23].

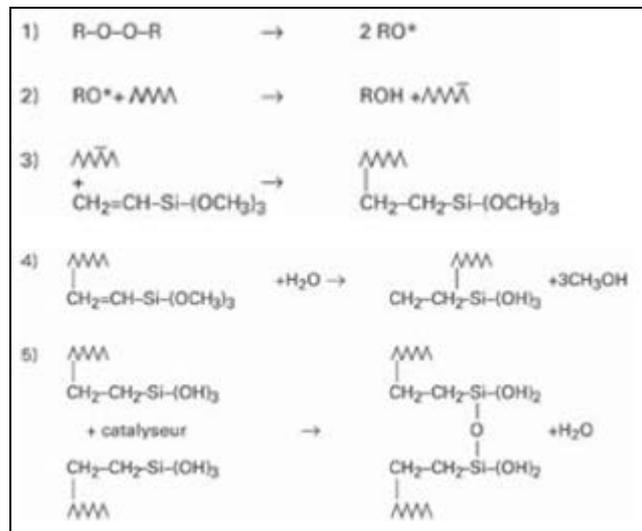


Figure 2.27 : Mécanisme de réticulation à l'aide de silanes [11]

La figure 2.27 montre le mécanisme de réticulation. Les équations numérotées de 1) à 3) sont dédiées au greffage du silane pour les procédés en une et deux étapes. Les équations 4) et 5) montrent le mécanisme de réticulation identique pour les trois procédés. Comme le montre l'équation 1), le greffage débute par la décomposition des peroxydes, qui libère des sites actifs. Ces sites transmettent leurs réactivités aux PE suivant la réaction 2). Les polyéthylènes activés se greffent sur les groupements silane comme le montre la réaction 3). La réticulation commence par une hydrolyse qui produit du méthanol et du silanol suivant l'équation 4). L'hydrolyse est accélérée en augmentant la température qui accroît la diffusion de l'eau, c'est le paramètre clé de la réticulation. La condensation des silanols est réalisée suivant l'équation 5). En présence de catalyseurs, les silanols se lient les uns aux autres et libèrent de l'eau [11].

c) Réticulation à l'aide de rayonnements

La réticulation sous rayonnement du PE a été décrite en 1950 [11]. Les sites actifs sont créés à l'aide de rayonnements qui entraînent l'ionisation des chaînes de polymères. Les chaînes activées forment des radicaux par extraction d'hydrogène. La réticulation prend forme par les radicaux qui se lient les uns aux autres. Les sources de rayonnement peuvent être des rayons γ du cobalt 60 (radioactif) et les rayons β (rayonnement d'électrons) [11].

Le procédé IR-PEX breveté par Maillefer-Extrusion® utilise le rayonnement infrarouge. Le principe est le même que pour la réticulation au peroxyde. L'apport d'énergie est réalisé par conduction pure grâce aux rayonnements, les tubes de vulcanisation et les étuves de chaleurs humides sont alors supprimés [10].

III.2) L'extrusion réactive : Moussage

Le moussage des polymères est essentiellement utilisé pour les câbles de télécommunication. Le moussage du polymère d'isolation permet de diminuer l'atténuation des signaux [11].

Le procédé de moussage consiste à introduire un gaz (CO_2 , H_2O vapeur, N_2 ...) dans le polymère fondu. L'introduction se fait après la zone de fusion de la vis d'extrusion. Le moussage peut être réalisé chimiquement ou physiquement [11].

a) Procédé de moussage ou d'expansion chimique

Le moussage est obtenu par l'incorporation d'un agent chimique par le fournisseur dans le PE en granulé. Sous l'effet de la chaleur, la molécule se décompose en gaz et forme le polymère moussé. Pour des raisons de toxicologie, même si il existe plusieurs agents moussants, le plus utilisé en câblerie est l'azodicarbonamide. Sa décomposition suivant la figure 2.28 produit de l'azote à 65%, du monoxyde de carbone à 32%, du dioxyde de carbone à 2%, de l'ammoniac à 1% et des résidus solides servant à la nucléation. Ces gaz forment le réseau de bulles dans le polymère [11].

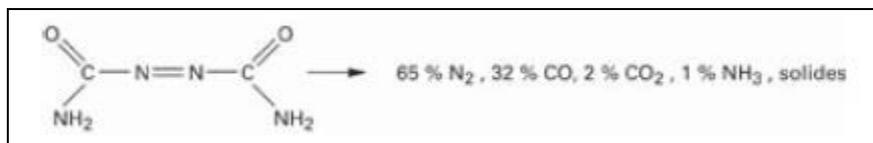


Figure 2.28 : Décomposition de l'azodicarbonamide [11]

Une extrudeuse standard est utilisée (L=24D), avec néanmoins une vis offrant un bon mélange. Ce mélange efficace est nécessaire pour que les agents de nucléations soient bien répartis dans la masse. La température doit être stable et mesurée précisément avec $\pm 0,5^\circ\text{C}$, un défaut de température fait varier le taux d'expansion et ainsi la capacité d'isolation. La température est de 150°C à 200°C . Chaque gramme de granulés peut libérer 15 à 200 cm^3 de gaz [11].

b) Procédé de moussage physique

Le gaz sous pression est injecté directement dans le polymère fondu. Sous l'effet de la chaleur et de la pression le gaz se dissout dans le polymère. Des agents de nucléation sont ajoutés par dosage volumétrique, ils sont inertes (talc, SiO_2 , TiO_2) ou réactifs (agents moussants). Une fois que le gaz est mélangé au polymère, le cisaillement doit être faible pour ne pas provoquer de débullages

IV. Refroidissement

Après l'opération d'extrusion une étape de refroidissement est nécessaire. Généralement, le refroidissement a lieu par immersion du conducteur (ou du câble) dans un long bac où de l'eau circule à co-courant de la ligne [11]. Voir figure 2.1 ou 2.30.

Le refroidissement est utile pour que le plastique se raffermisse et ne subisse pas de déformations durant les étapes suivantes (bobinage, stockage...). Le dimensionnement des bacs est donc important. Un bac trop petit ne refroidirait pas assez le matériau. Un bac trop grand engendre un coût et une occupation d'espace inutile [11].

Le bilan énergétique sur le câble tient compte de la **convection forcée avec l'eau**, de la **conduction à l'intérieur du câble** et de la **quantité de chaleur à l'intérieur du câble**. L'énergie stockée dans l'élément est égale à l'ensemble des énergies entrantes par conduction [11].

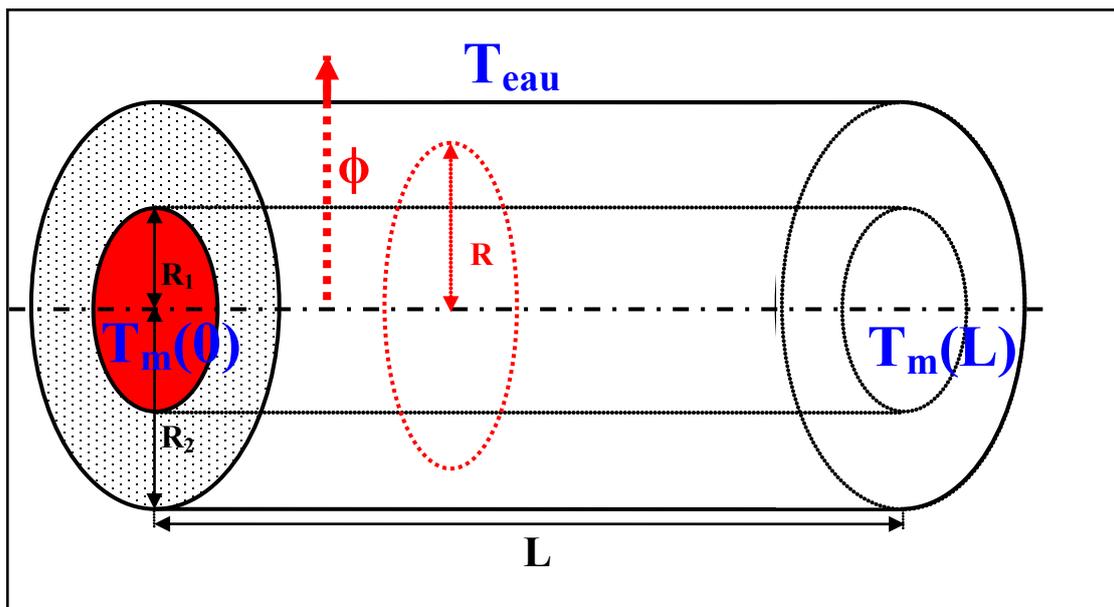


Figure 2.29 : schéma d'un fil conducteur simple durant refroidissement

D'après [11], pour un fil fin simple composé d'une âme en cuivre et d'un isolant, la conduction est négligée face à la convection et on suppose que la température est constante dans le câble sur l'ensemble de son rayon. La longueur du bac est alors donnée par la relation suivante :

$$L = \frac{(R_1^2 \rho_{Cu} C_{p_{Cu}} + (R_2^2 - R_1^2) \rho_{isol} C_{p_{isol}}) w}{-2hR_2} \ln \left(\frac{T_m(L) - T_{eau}}{T_m(0) - T_{eau}} \right)$$

Avec,

L	la longueur du bac	m	h	le coefficient de convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
R_1	le rayon du cuivre	m	$T_m(L)$	température du câble en sortie de bac	$^{\circ}C$
R_2	le rayon à l'isolation	m	$T_m(0)$	température du câble en entrée du bac	$^{\circ}C$
ρ	la masse volumique	$kg.m^{-3}$	T_{eau}	température de l'eau	$^{\circ}C$
C_p	la capacité calorifique	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	w	la vitesse de la ligne	$m.s^{-1}$

Pour des câbles de diamètres supérieurs à 1,4 mm, l'équation ci-dessus ne permet pas de calculer la longueur du bac. En effet, pour des diamètres plus grands, la variation de températures suivant le rayon est trop importante pour négliger son impact [11].

V. Contrôle du procédé

Pour offrir un câble avec les caractéristiques souhaitées, divers contrôles sont effectués le long de la ligne de fabrication.

V.1) Mesure de circularité

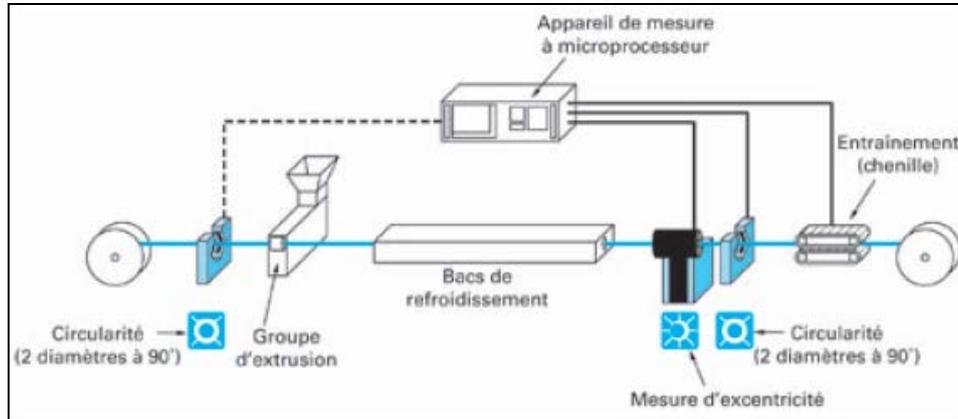


Figure 2.30 : Mesure de circularité sur une ligne d'isolation [10]

La figure 2.30 montre les mesures de circularité et d'excentricité réalisées sur une ligne d'isolation. La circularité de l'âme tréfilée est mesurée avant extrusion et après le refroidissement. L'appareil de mesure est placé après le refroidissement. La mesure peut être liée à un actionneur qui stoppe la ligne en cas de déviation des valeurs [10].

La mesure de circularité consiste à mesurer le diamètre du fil ou du câble suivant plusieurs axes. Pour ces mesures des systèmes optiques avec faisceaux collimatés et frange de diffractions sont le plus généralement utilisés [10].

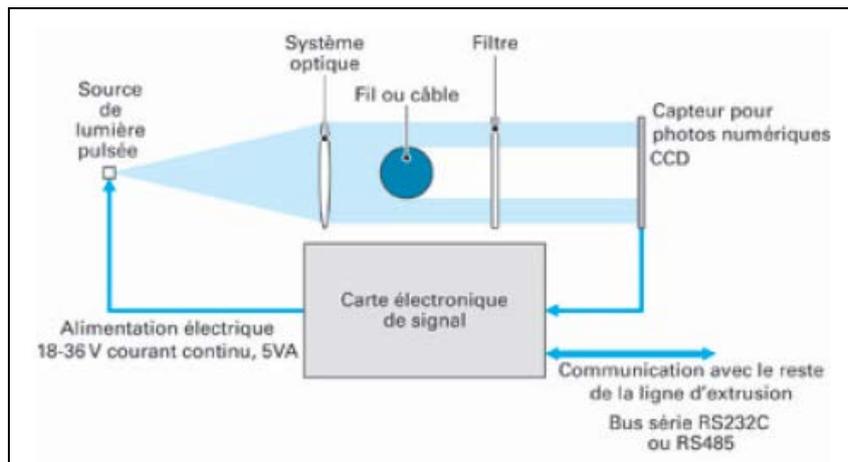


Figure 2.31 : Système de mesure du diamètre par faisceaux collimatés [10]

La figure 2.31 montre la mesure du diamètre par faisceaux collimatés. Une source de lumière envoie des rayons parallèles grâce à une lentille de collimation. Les faisceaux éclairent perpendiculairement le fil ou le câble, l'ombre est alors projetée sur un capteur qui calcule le diamètre du câble [10].

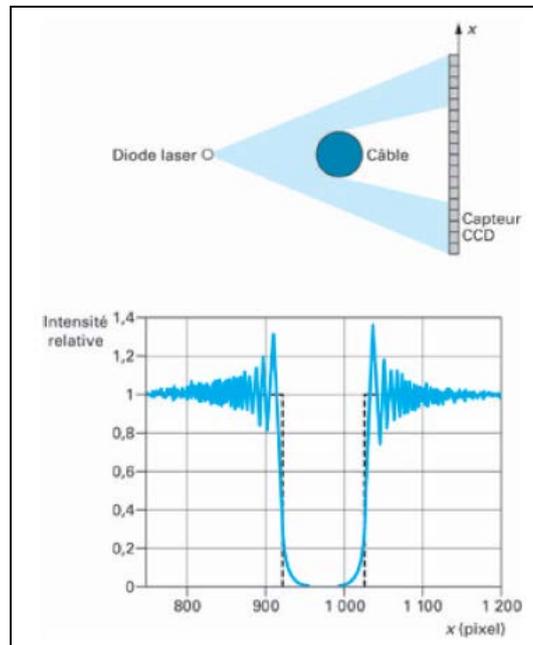


Figure 2.32 : Système de mesure du diamètre par frange de diffraction [10]

Comme le montre la figure 2.32, La mesure du diamètre par frange de diffraction est réalisée à l'aide de l'ombre portée sur le capteur, mais elle n'utilise pas de lentille de collimation. Les franges de diffractions sont analysées mathématiquement et permettent le calcul précis du diamètre. La distance entre le câble et la diode n'a pas d'incidence sur le résultat [10].

V.2) Mesure d'excentricité

La mesure de l'excentricité met en évidence le positionnement de l'âme par rapport à l'isolant dans le conducteur. La mesure est réalisée à l'aide d'un champ magnétique. Comme le montre la figure 2.31, la mesure d'excentricité se fait sur la ligne d'extrusion après le refroidissement. Le fil est guidé dans une bobine dans laquelle un champ magnétique haute fréquence est induit. La bobine de haute sensibilité tourne autour de la surface du câble à haute vitesse (jusqu'à 1200 tr.min⁻¹), la mesure de l'induction des différents composants renseigne sur l'excentricité [10].

V.3) Contrôle des défauts d'isolation

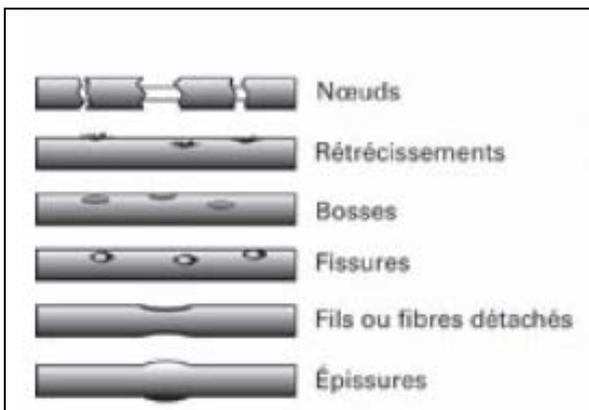


Figure 2.33 : Défauts d'isolation [10]

Pour mettre en évidence les défauts d'isolation tels que les nœuds, les arrachements ou les micros trous présentés en figure 2.33, le fil isolé passe dans un rideau d'électrodes (chainettes métalliques) en contact avec l'isolant. Le potentiel des électrodes par rapport à l'âme du conducteur est élevé, il va de 0,5 à 50 kV suivant le type de câble. Si un défaut d'isolation intervient, l'appareil détecte un courant de fuite dû à une étincelle.

Lorsqu'un défaut est détecté, la ligne de production s'arrête jusqu'à résolution du problème.

Pour détecter les bosses ou les rétrécissements, un contrôle est réalisé avec un système par faisceaux infrarouges.

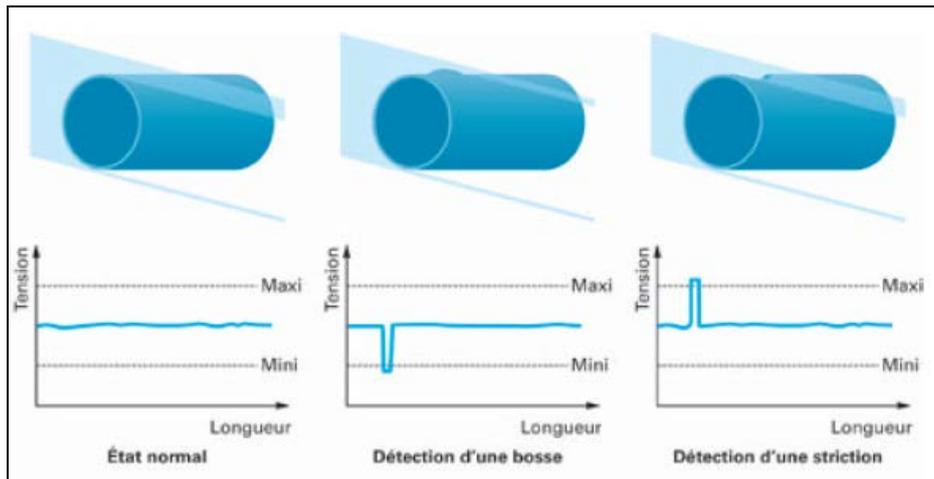


Figure 2.34 : Détection d'une bosse ou d'une striction par faisceaux infrarouges [10]

Comme le montre la figure 2.34, les bosses et les strictions sont détectées à l'aide d'un rayon infrarouge émis perpendiculairement au câble. Un récepteur donne une tension en fonction de la lumière reçue. L'apparition d'une bosse ou d'une striction fait varier la tension. Des niveaux de bosses maximales et frictions minimales admissibles sont spécifiés [10].

V.4) Mesure de capacité pour les câbles de télécommunication

La capacité du câble est mesurée par une **sonde capacitive** placée dans le bac de refroidissement. C'est la mesure électrique principale des câbles de télécommunication [38].

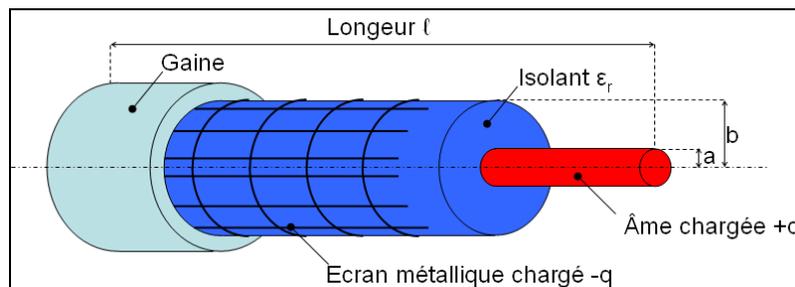


Figure 2.35 : Comportement condensateur d'un câble coaxiale [10]

Comme le montre la figure 2.35, un câble parcouru par un courant électrique offre les caractéristiques d'un condensateur [24 ; 25]. L'âme du conducteur est chargée +q et l'écran métallique -q, l'isolant est un diélectrique de permittivité relative ϵ_r (ou constante diélectrique relative) sans unité. L'expression de la capacité C est :

$$C = \frac{Q}{V}$$

Avec,

C la capacité en Coulomb/Volt ou Farad F

Q la quantité d'électricité en Coulomb

V la différence de potentiel en Volt

La capacité est donc une quantité d'électricité par volt, soit le Farad F. Le Farad étant une unité élevée, des sous multiples tel que le μF sont utilisés.

Cette capacité est liée aux rapports des diamètres et la permittivité absolue ϵ .

$$C = 2\pi \times \epsilon_A \times \frac{l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

Avec,

ϵ_A la permittivité ou constante diélectrique absolue

l la longueur du câble

b le rayon de l'isolant

a le rayon du conducteur

La permittivité absolue est calculée à partir de :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_A}{\epsilon_0}$$

Avec,

ϵ_r la permittivité relative ou constante diélectrique relative adimensionnelle

ϵ_A la permittivité ou constante diélectrique absolue A.s.V⁻¹.m⁻¹

ϵ_0 la permittivité ou constante diélectrique du vide 8,854187.10⁻¹² A.s.V⁻¹.m⁻¹

Tableau 2.1 : Permittivité relative de quelques éléments [10 ; 26]

Polymère	PE-BD	PE-HD	PVC	Eau
ϵ_r	2,27	2,25	3,1	81

Le tableau 2.1 montre la permittivité relative des quelques isolants pour câbles et de l'eau. A partir de l'expression de la permittivité relative, l'expression de la capacité devient :

$$C = 2\pi \times \epsilon_r \epsilon_0 \times \frac{l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

La capacité en Farad par mètre est donné par :

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon_r \epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

La mesure de capacité pour un fil de télécommunication est réalisée dans le bac de refroidissement. L'eau joue le rôle du conducteur extérieur chargé -q [10].

VI. Exemples d'éléments de construction d'un câble

VI.1) Bande de mica



Figure 2.36 : Mica muscovite naturelle [27]

La figure 2.36 montre le mica sous sa forme de roche naturelle. Le type de mica présenté est la muscovite. Elle se présente sous forme de feuillets flexibles et transparents.

Après divers traitements, cette roche est mise sous forme de bandes en rouleaux. Le rouleau tel quel est utilisé en câblerie.

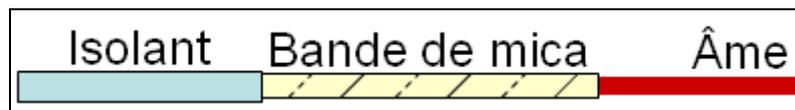


Figure 2.37 : Bande de mica enroulé sur l'âme

Comme le montre la figure 2.37, le mica est enroulé autour de l'âme et se trouve sous l'isolant. Dans un câble composé de plusieurs conducteurs, en cas d'incendie toutes matières organiques peuvent subir des combustions. Le rôle de la bande de mica est d'empêcher que les âmes des conducteurs entrent en contact les uns avec les autres une fois que l'isolation a brûlé.

VI.2) Bande de polyester

Ces bandes servent essentiellement à créer des groupes de conducteurs par paires, tierces ou quarts. Dans certains cas les groupes de conducteurs sont enrobés de gel (surtout pour les câbles téléphoniques), les bandes de polyesters servent à maintenir le gel autour des conducteurs avant le gainage du câble.

VI.3) Ecran aluminium

L'écran aluminium sert à protéger les conducteurs. Il peut être utilisé pour créer des groupes de conducteurs comme les bandes de polyester.

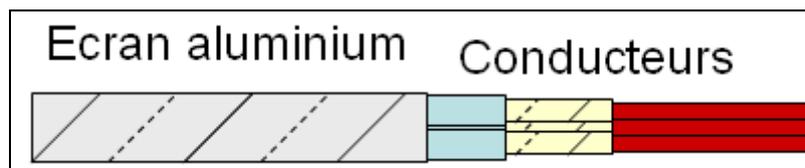


Figure 2.38 : Ecran aluminium autour des conducteurs

La figure 2.38 montre un écran en aluminium enroulé autour d'un groupe de conducteurs avec une inclinaison de 45°. L'écran peut aussi être enroulé sur la longueur. Pour les câbles d'énergie, l'utilisation des écrans aluminiums permet de différencier les câbles à champs radiaux et à champs non radiaux [9 ; 25].

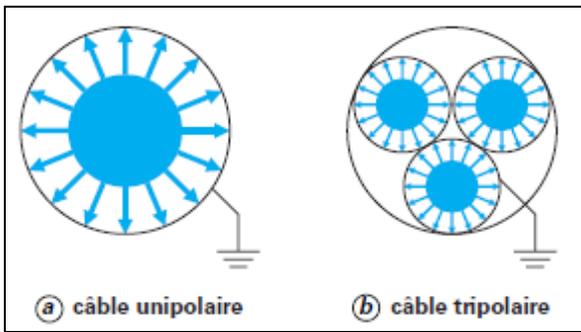


Figure 2.39 : Ceinture radiale [25]

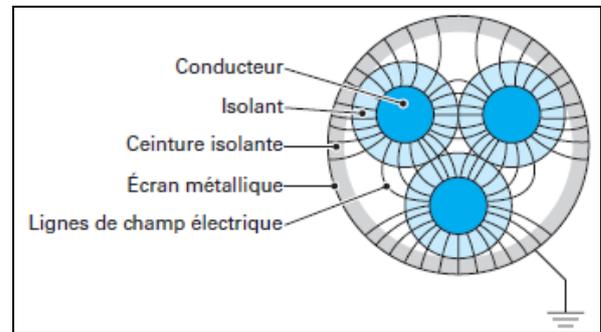


Figure 2.40 : Ceinture non radiale [25]

Les figures 2.39 et 2.40 montrent l'utilisation d'un écran métallique relié à la masse. Cet écran permet de stopper les lignes de champs électriques entre les conducteurs. Ces lignes de champs électriques provoquent des contraintes importantes et peuvent provoquer la destruction de l'isolant. Pour les câbles de la figure 2.40 des défauts conducteur/écran mais aussi entre conducteurs existent [25].

VI.4) Armure métallique

Pour protéger physiquement les câbles des contraintes extérieures l'utilisation d'armures est souvent nécessaire [9 ; 25]. Ces armures sont en métal, généralement à base de cuivre ou d'acier.

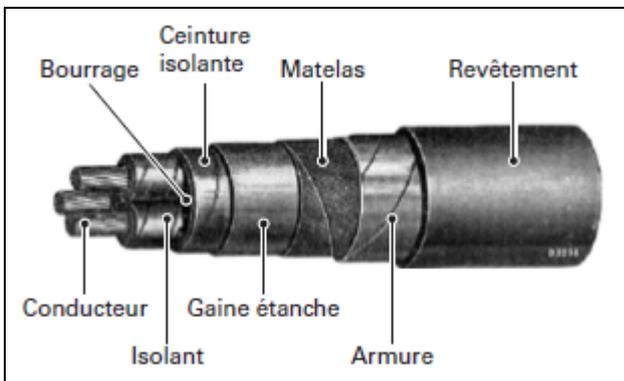


Figure 2.41 : Câble armé [25]

La figure 2.41 montre la construction d'un câble avec une armure. Les types d'armures sont variés, ce sont des broderies, des tiges, des plaques ou des rubans métalliques. La figure 2.40 illustre un blindage par ruban métallique.

Les armures sont généralement placées juste en dessous de la gaine extérieure.

VI.5) Bourrage

La principale fonction du bourrage est de donner une forme circulaire aux groupes de conducteurs.

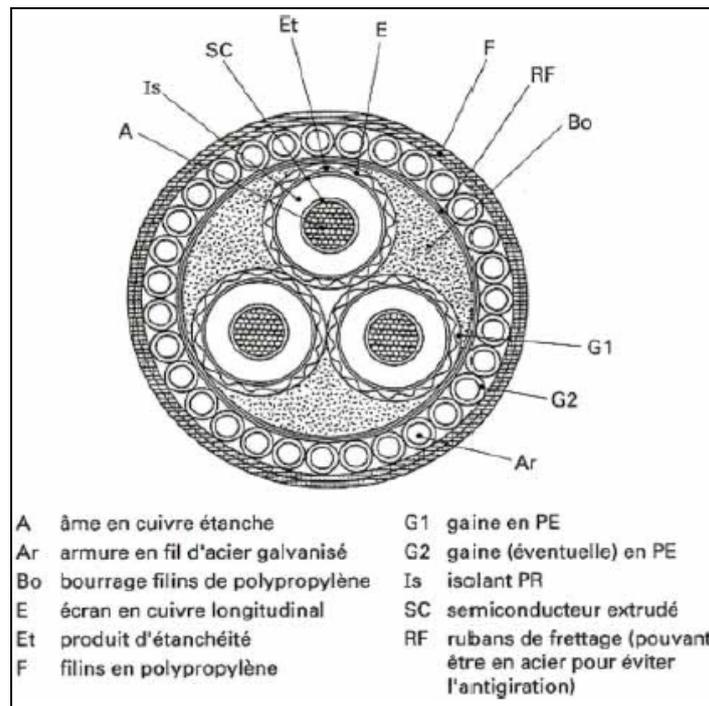


Figure 2.42 : Câble sous-marin 20 kV [12]

La figure 2.42 montre la section d'un câble sous-marin. Dans ce câble composé de trois conducteurs, sans le bourrage, le gainage donnerait une section triangulaire.

VI.6) Divers

Suivant les spécificités requises pour les câbles d'autres éléments sont utilisés. Par exemple, les conducteurs peuvent être couverts de talc pour éviter qu'ils adhèrent au bourrage...

VII. Conclusion

Les câbles permettent le transport d'énergie et de signaux grâce aux propriétés conductrices des métaux et des propriétés isolantes des polymères.

Bien que les câbles soient de structures extrêmement variées, les étapes de fabrication de bases sont le tréfilage, l'isolation et le gainage. Suivant les besoins, divers éléments s'ajoutent lors du procédé de fabrication (bande de mica, écran, armure...).

La diversité des éléments de constructions permet de créer des câbles aux propriétés spécifiques liées à leurs applications.

CHAPITRE 3 : PHENOMENES DE LA COMBUSTION

Comme le montre le chapitre 2, les câbles sont composés de matériaux plastiques. Ces derniers offrent un caractère inflammable aux câbles. Ce chapitre présentera de manière générale les phénomènes de combustions ainsi que les solutions pour les combattre.

I. Généralités sur la combustion

I.1) Définition et paramètre de combustion

D'après [28], la combustion est une réaction chimique globale et généralement fortement exothermique. La réaction est autonome et susceptible de s'accélérer et d'émettre des rayonnements. Elle peut être lente, vive, turbulente, spontanée, catalytique...

D'après [28 ; 29], les réactifs en jeu lors de la combustion sont **les combustibles** (hydrocarbures et composés oxygénés) et **les comburants** (généralement l'air ou l'oxygène). Pour former un feu il faut une source d'énergie appelé énergie d'activation (flamme ou surpression).

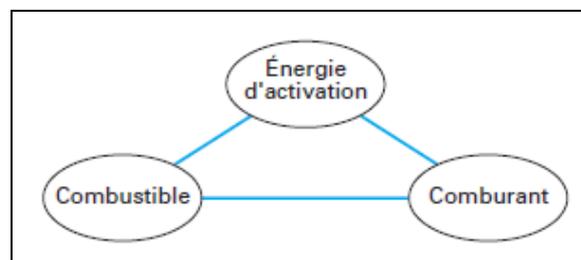


Figure 3.1 : Triangle du feu [29]

La figure 3.1 schématise le triangle du feu. Les trois éléments sont nécessaires pour provoquer un incendie.

D'après [29], pour effectuer la combustion d'un gaz il faut que le mélange des gaz combustible et comburant soit adéquat. Des limites d'inflammabilité, en tableaux 3.1, existent pour les proportions gaz combustible/ air :

- **La limite inférieure d'inflammabilité (LII)** : le taux de combustible est trop bas.
- **La limite supérieure d'inflammabilité (LSI)** : le taux de combustible est trop haut.

Gaz	Limites d'inflammabilité	
	Inférieure (%)	Supérieure (%)
Butane	1,9	8,5
Propane	2,2	9,5
Essence (vapeur)	1,4	7,6
Ethanol (vapeur)	3,3	19

Une fois dans les limites d'inflammabilité, une source d'énergie doit être en mesure de porter le mélange à une température minimale appelée **température d'auto-inflammation**. Les températures de quelques gaz sont données en tableau 3.2.

Gaz	Température d'auto-inflammation (°C)
Butane	405
Propane	450
Essence (vapeur)	270
Ethanol (vapeur)	365

Pour les liquides inflammables, le **point d'éclair** définit la température à laquelle le liquide émet des vapeurs suffisamment importantes pour former un mélange combustible avec l'air.

Gaz	Point d'éclair (°C)
Essence	-40
Kérosène	+40
Gazole	+70
Acétone	-18
Ethanol	+13
Ether	-45

La combustion des solides est plus complexe que celle des liquides et des gaz. Lors d'une élévation de température, certains solides émettent des gaz combustibles, d'où une similitude avec le point d'éclair d'un liquide.

Solide	Températures d'inflammation (°C)
Bois	280 à 340
Charbon	250
Charbon de bois	250 à 350
Coton	450
Papier journal	185
Papier à lettre	360
Polyéthylène	350
Polystyrène	490
Polyamide	425
Mousse polyuréthane	330

Le tableau 3.4 montre les températures d'inflammations de quelques solides courants.

I.2) Réaction globale de la combustion d'un hydrocarbure



L'équation (3.1) montre la combustion complète d'un hydrocarbure de formule générale $C_m H_n$ par de l'oxygène. Le produit de la combustion est du CO_2 et de l'eau. Lors d'une combustion incomplète d'autres réactions ont lieu et des produits lourds peuvent se former (par exemple de la suie) [28].

I.3) Cinétique chimique et étapes réactionnelles

La cinétique chimique s'intéresse à l'évolution d'un système dans le temps, avec formation et/ou disparition d'espèces chimiques. L'étude de la cinétique chimique de la combustion permet de déterminer la nature chimique des intermédiaires réactionnels ainsi que les différentes étapes élémentaires du processus. La combustion est complexe car elle comporte un grand nombre (des centaines) de réactions élémentaires [28].

a) Etapes réactionnelles

(i) Les réactions d'initiation (amorçage)

Durant cette étape les premiers radicaux libres sont formés. Les radicaux libres initient la combustion. Ils génèrent ensuite de nouveaux radicaux libres suivant les processus de **propagation** et de **ramification** [28].

(ii) Les réactions de propagation (métathèse)

C'est suivant ces réactions que les produits sont formés et que les réactifs sont consommés. Durant cette étape il n'y a pas de formation supplémentaire de radicaux, les radicaux consommés sont remplacés.

(iii) Réaction de ramification

Ces réactions augmentent le nombre de radicaux libres et elles sont indispensables pour la combustion [28].



Les réactions (3.2) et (3.3) montrent l'augmentation du nombre de radicaux à haute température $> 1200 \text{ K}$ [28].



La réaction (3.4) montre la formation de nouveaux radicaux à température intermédiaire ($800 \text{ K} < T < 1200 \text{ K}$) avec M étant un composé quelconque inerte [28].

(iv) Les réactions de recombinaisons radicalaires

Les radicaux principalement actifs durant la combustion sont OH^\bullet , H^\bullet , O^\bullet , HO_2^\bullet , CH_3^\bullet , CHO^\bullet ...

(v) Réactions des alcènes

Les produits des réactions de propagation forment des radicaux avec des doubles liaisons. Ils sont capables de réagir avec les radicaux et de former des adduits plus ou moins stables qui peuvent se décomposer [28].

b) Modèle de cinétique réactionnel

Toujours d'après [28], la diversité des réactions possibles et la quantité d'espèces présentes durant la combustion, obligent l'emploi d'hypothèses qui simplifient la création du modèle cinétique. Des logiciels ont été mis au point pour prévoir le modèle cinétique en fonction des réactifs. Le modèle obtenu informatiquement est vérifié expérimentalement pour juger de sa validité. Ce type de logiciel permet de modéliser la combustion de l'éthylène par de l'oxygène comme étant la somme de 400 réactions et la formation de 77 espèces [28].

I.4) Formation de la suie

La suie est responsable de l'opacité des fumées de combustion, ce paragraphe s'intéresse à sa formation lors de la combustion.

D'après [28], la suie est produite à partir du benzène formé lors de la combustion.

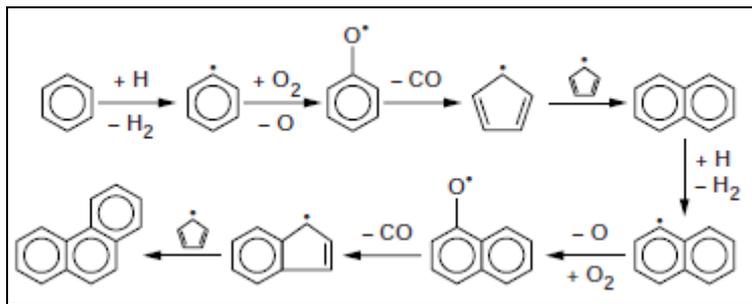


Figure 3.2 : Formation d'hydrocarbure aromatique polycyclique à partir du benzène [28]

D'après la figure 3.2, les réactions radicalaires successives du benzène donnent le naphthalène puis le phénanthrène.

D'autres mécanismes existent pour décrire la formation des **hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**. Le réactif de base reste le benzène mais les intermédiaires réactionnels sont différentes [28].

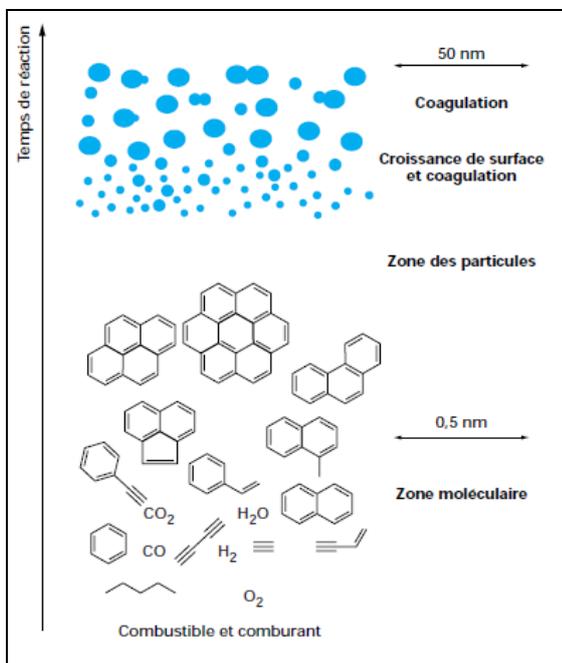


Figure 3.3 : Formation de la suie [28]

La formation croissante des HAP conduit à la formation de produits lourds et contribue ainsi à la formation de la suie.

La suie est composée de carbone et d'hydrogène, sa formule brute est C_8H [28].

Les suies sont des particules sphériques de type graphite.

La figure 3.3 montre la formation de la suie à partir d'hydrocarbures légers en milieu homogène. La croissance des HAP forme des espèces de tailles moléculaires puis de la taille de particules plus grandes. Ces particules coagulent entre elles pour donner la suie tout en gardant une géométrie sphérique.

Des recherches sont réalisées pour éviter la formation des suies et avoir une combustion « propre ».

II. Combustion des polymères

II.1) Processus en jeu

Comme nous venons de le voir, la combustion est une réaction en chaîne complexe. Dans le chapitre 2, nous avons vu que les polymères sont utilisés sous forme de formulations complexes et très variées, cette complexité impacte forcément la combustion.

D'après [30] la combustion d'un polymère se fait en 5 étapes :

- 1) L'échauffement : une source de chaleur extérieure vient échauffer le matériau. L'échauffement est réalisé par conduction à partir de la surface exposée.
- 2) La dégradation thermique : sous l'effet de l'échauffement, après une température critique en surface, la dégradation thermique va donner naissance à une phase gazeuse.
- 3) L'inflammation : Le mélange avec l'air des gaz de pyrolyse donne une **phase gazeuse inflammable**. L'inflammation est alors activée par une source d'énergie ou spontanément.
- 4) La combustion : l'inflammation des gaz provoque une nouvelle source de chaleur apte à produire des gaz de combustion. L'incendie se propage.
- 5) Effets thermiques : la combustion du polymère crée un nouveau foyer avec un couplage de flux thermique et flux de gaz qui accélèrent la réaction.

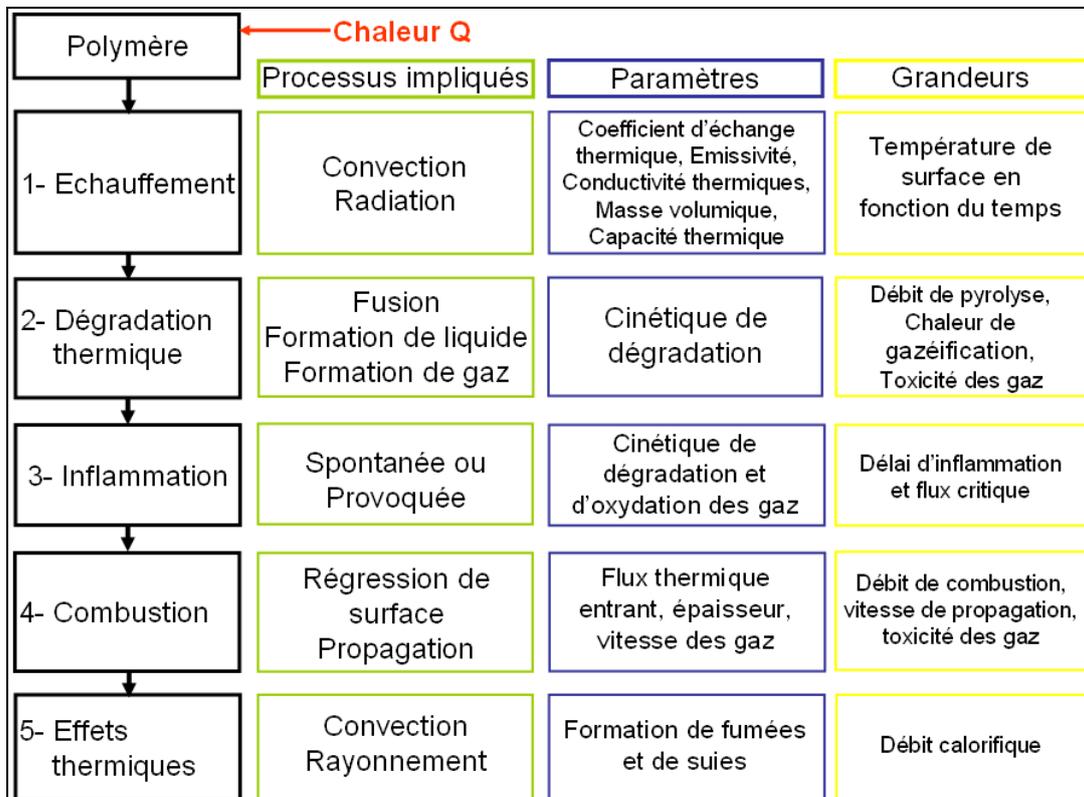


Figure 3.4 : Processus mis en jeu lors de la combustion [30]

La figure 3.4 récapitule les 5 étapes du processus de combustion des polymères ainsi que les paramètres qui leur sont affectés. Chaque étape possède des paramètres qui lui sont propres et des moyens de mesures pour les quantifiés existent. Les pages qui suivent détailleront chaque étape.

II.2) Echauffement

L'échauffement du plastique est fourni par la convection des gaz chauds et le rayonnement du foyer. Pour des flammes inférieures à 50 cm la convection est la source principale. Lorsque les flammes sont supérieures à 1 m, le rayonnement devient la source d'échauffement prépondérante. La chaleur peut être totalement absorbée en surface et transférée au sein du matériau par conduction, comme pour tous les autres matériaux courants (bois, carton...). Pour certains polymères tels que le PE ou le PP, les flux radiatifs sont absorbés en profondeur. Sous l'effet de l'échauffement la fusion du plastique peut avoir lieu, c'est le cas du PE et du PP. Cette fusion provoque l'écoulement et la formation de gouttelettes qui peuvent s'enflammer [30].

II.3) Dégradation thermique

Sous l'effet de la chaleur, le polymère se dégrade par des réactions de réarrangements, de réticulations ou de pyrolyses. En effet des liaisons atomiques se créent ou se brisent, générant ainsi de nouvelles molécules [30].

La pyrolyse du PE et du PP donne une rupture statistique le long de la chaîne du polymère. Les produits ont des masses molaires variées et sont sous forme gaz, liquide ou solide. Pour d'autres polymères, la pyrolyse crée des ruptures en des points précis de la chaîne et libère ainsi le monomère [30].

La dégradation thermique du matériau est un phénomène important car il conduit à la formation des gaz combustibles qui forment les flammes (par mélange avec l'air) [30].

Le débit massique de pyrolyse est noté Q_p'' et est exprimé en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Si la surface exposée est connue, le flux massique des gaz pyrolyse peut être exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Sur un matériau épais, le flux massique des gaz de pyrolyse croît linéairement avec le flux thermique incident [30] :

$$Q_p'' = \frac{q'' - q_p''}{\Delta_g H}$$

Avec

q''	Le flux thermique incident	$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
q_p''	Le flux de perte de chaleur à la surface	$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
$\Delta_g H$	L'enthalpie massique de gazéification du matériau	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

II.4) L'inflammation

L'inflammation est désignée comme **la naissance d'une flamme au voisinage immédiat d'un matériau**. Dans d'autres circonstances, lors d'un feu de compartiment, l'inflammation peut être due à l'embrasement généralisé des gaz accumulés en hauteur (*flashover*) [30].

Pour que les gaz combustibles s'enflamment, le mélange gazeux doit se trouver entre les limites inférieures et supérieures d'inflammabilité. Dans ces conditions, le mélange peut s'enflammer spontanément (résultat de l'exothermicité de la réaction) ou à l'aide d'une source d'énergie extérieure (flamme, particules incandescentes). L'inflammation des gaz se réalise lorsqu'ils sont à des températures supérieures ou égales à leurs températures **d'auto-inflammation** [29 ; 30].

Lors de l'inflammation, les grandes caractéristiques sont **le délai, la température et le flux énergétique** [30]. Le délai et la température sont mesurés simultanément grâce à

des essais en laboratoire, pour cela un échantillon de quelques grammes est introduit dans un four et porté à une température constante, l'inflammation ou non est observée. En répétant cet essai à des températures variées, la température d'auto-inflammation de l'échantillon est déterminée. Le délai d'inflammation est alors mesuré pour chaque température. L'inflammation étudiée dans un calorimètre sous un flux de chaleur contrôlé, permet de déterminer le délai et le flux énergétique minimal [30].

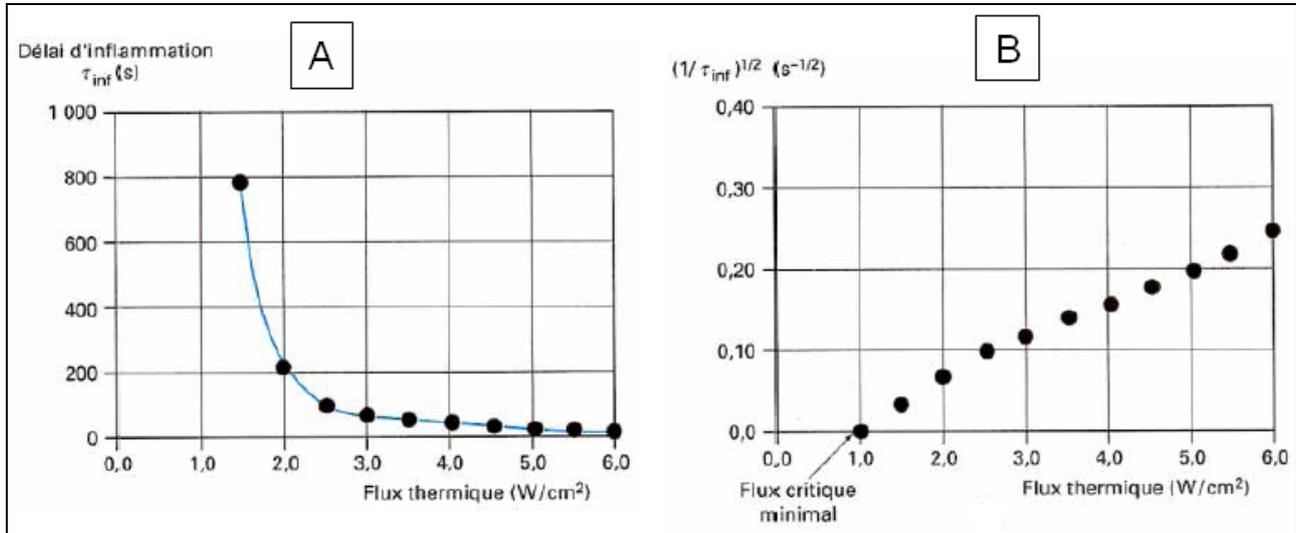


Figure 3.5 : Détermination du flux critique minimal sur un échantillon de PMMA [30]

Le graphique A en figure 3.5 montre la variation du délai d'inflammation τ_{inf} en fonction du flux thermique incident sur un échantillon de polyméthacrylate de méthyle (PMMA). Comme le montre le graphique B de cette même figure, pour un matériau épais, le tracé de $(1/\tau_{inf})^{0,5}=f(q'')$ est linéaire. Cette droite permet de déterminer le flux critique minimal d'inflammation [30].

II.5) Combustion et propagation de la flamme

L'inflammation d'un plastique conduit à sa combustion. Il se forme un nouveau foyer qui, à son tour, crée de l'échauffement, puis une pyrolyse et à nouveau une inflammation. Cette répétition du processus conduit à la propagation de la flamme.

La propagation dépend de la nature chimique du matériau, de ses propriétés physiques (masse volumique, capacité thermique...) et de sa géométrie. La propagation de la flamme est favorisée lorsqu'elle se fait verticalement et du bas vers le haut. La propagation horizontale ou verticale de haut vers le bas est beaucoup plus lente. La vitesse de propagation est fonction de l'épaisseur de l'échantillon, du sens de propagation de la flamme, de l'influence du rayonnement extérieur, de l'influence de la convection naturelle ou forcée et de la teneur en oxygène de l'atmosphère gazeuses [30].

Le débit massique de combustion est noté Q_c'' , il est exprimé en kg.s⁻¹. Si la surface qui produit les gaz est connue, Q_c'' peut être exprimé en kg.m⁻².s⁻¹. Les phénomènes caractérisés par le débit massique de combustion sont identiques à ceux du débit massique de pyrolyse. Dans les deux cas, sous l'effet de la chaleur, le matériau s'échauffe, se dégrade et produit des gaz combustibles. Cependant, dans un régime de pyrolyse, la source d'énergie est extérieure et peut être contrôlée, alors que dans un régime de combustion, la source d'énergie principale est essentiellement la propre flamme du

matériau et d'autres sources peuvent s'y ajouter. Le contrôle du couple énergie/matière est plus délicat en régime de combustion.

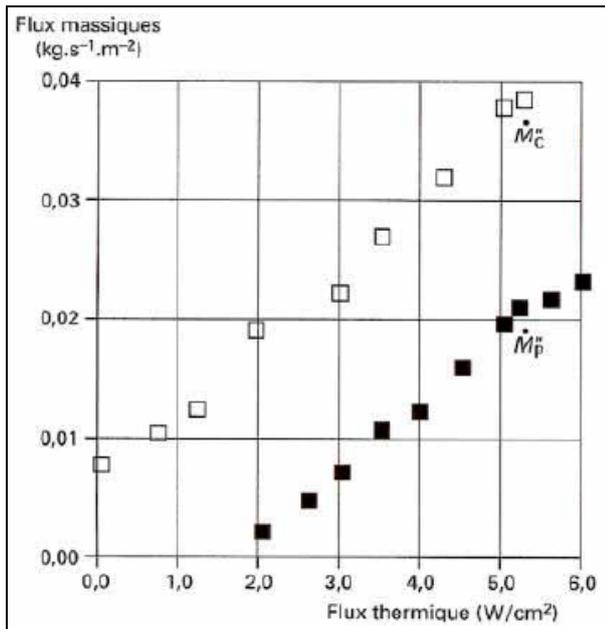


Figure 3.6 : Comparaison des flux massique de combustion et de pyrolyse sur un échantillon de PMMA [30]

La figure 3.6 illustre les débits massiques en régime de pyrolyse et de combustion. Dans les deux cas, le flux varie linéairement en fonction du flux thermique externe. Ces essais réalisés sur des échantillons de petites dimensions (barreau de 10 cm) de poly méthacrylate de méthyle (PMMA) et dans des conditions bien définies permettent de définir le **flux thermique provenant de la flamme** [30].

Pour étudier le couplage énergie/matière en combustion le **nombre de transfert de Spalding**, noté B et adimensionnel, est utilisé. Ce nombre relie la quantité de chaleur libérée par la flamme et l'enthalpie de gazéification du polymère. Il est déterminé par la mesure directe des enthalpies de gazéification de combustion [30].

$$B = \frac{\frac{m_{ox}}{r} \times \Delta_C H - C_{PG} \times (T_S - T_\infty)}{\Delta_g H}$$

Avec

m_{ox} Fraction massique d'oxygène dans l'air

r Rapport massique stœchiométrique d'oxygène et de combustible

$\Delta_C H$ Enthalpie massique de combustion du polymère $J.kg^{-1}$

C_{PG} Capacité thermique massique des gaz $J.kg^{-1}.^\circ C^{-1}$

T_S Température de surface du polymère $^\circ C$

T_∞ Température des gaz loin de la flamme $^\circ C$

$\Delta_g H$ Enthalpie massique de gazéification du matériau $J.kg^{-1}$

La valeur élevée de ce nombre de Spalding caractérise un matériau dont la combustion est intense. L'intensité est due à un dégagement de chaleur important de la flamme ou à une faible enthalpie de gazéification. La présence de la fraction d'oxygène dans l'expression de B permet de diminuer sa valeur dans un environnement confiné.

Le flux calorifique Φ_c en $J.s^{-1}$ définit la vitesse de production de chaleurs des composés. Ce flux est déterminé par l'utilisation du calorimètre qui calcule simultanément le débit massique de combustion Q_C'' . La connaissance de ces deux paramètres permet de calculer l'enthalpie massique de combustion en $J.kg^{-1}$ (**pouvoir calorifique**) $\Delta_C H$:

$$\Delta_C H = \frac{\Phi_c}{Q_C''}$$

Le pouvoir calorifique du PE est de 42 kJ.g⁻¹ et celui du PVC de 25 kJ.g⁻¹ [30].

II.6) Natures et compositions des produits de combustion

Les gaz de la combustion des plastiques sont essentiellement composés de CO₂ et de H₂O comme pour les gaz de combustion des hydrocarbures. Suivant la nature du plastique, les fumées peuvent être **toxiques, corrosives et/ou inflammables** [30].

Lors d'une combustion incomplète, le PE-HD dégage, en plus de l'eau et du dioxyde de carbone, de l'oxyde de carbone, des hydrocarbures aliphatiques ou aromatiques et différents produits oxygénés [16]. La présence du chlore dans le PVC conduit au dégagement de HCl et d'autres hydrocarbures chlorés dans les gaz de combustion, la toxicité et la corrosivité des fumées sont alors importantes [19 ; 59]. La présence d'azote dans la formule du polymère permet la formation d'acide cyanhydrique [30].

Les mesures de toxicité sont réalisées sur l'exposition d'animaux aux gaz des produits de combustion. L'indice de **concentration létale** LC₅₀ (*en anglais Lethal Concentration*) correspond à la concentration de gaz nécessaire aux décès de 50% des animaux exposés aux gaz de combustion pendant 30 minutes, et suivant une période de 24 heures ou 14 jours [30].

La détermination de l'indice de toxicité est réalisée à partir des mesures de concentration des principaux gaz toxiques et des valeurs de LC₅₀. Cette procédure est désignée par N-gaz hypothèses car le nombre de gaz varie en fonction du matériau initial. Cinq gaz sont généralement considérés pour calculer une grandeur désignée en anglais par *Fractional Effective exposure Dose* (FED) [30] :

$$FED = \frac{m[CO]}{[CO_2] - b} + \frac{[HCN]}{LC_{50}HCN} + \frac{[HCl]}{LC_{50}HCl} + \frac{21 - [O_2]}{21 - LC_{50}O_2}$$

Le calcul de FED se fait avec des concentrations en ppm pour CO, HCN, HCl et CO₂ et en % pour O₂. Les termes m et b sont introduits pour tenir compte de l'influence du CO₂ sur la toxicité du CO. Pour une concentration de CO₂ inférieure à 5% m=-18 et b=122 000, sinon m=22,7 et b=-39 000. Les valeurs des LC₅₀ sont :

- LC₅₀HCN = 110 ppm
- LC₅₀HCl = 3800 ppm
- LC₅₀O₂ = 5,4%

Une valeur de FED égale à 1,1 conduit à un taux de mortalité de 50% des rats exposés pendant 30 minutes et suivis pendant 24 heures de postexposition [30].

III. Adjuvant retardateur de flamme

Comme nous l'avons vu les polymères sont des sources de combustibles. Différents composés sont utilisés dans la formulation des polymères pour améliorer leurs comportements au feu. Ces agents ignifugeants introduits dans les polymères **ne les rendent pas incombustibles mais retarde leurs combustions**. Les retardateurs de flammes permettent aux matériaux de passer favorablement les tests de résistance au feu. L'efficacité du retardateur, la réduction des fumées et une toxicité des matériaux réduite au maximum en cas d'incendie, sont les principales préoccupations des fabricants et législateurs. Dans certains cas, ces additifs modifient défavorablement les propriétés mécaniques du plastique, leurs incorporations doivent donc être minimisées. Les retardateurs de flammes sont généralement des composés halogénés, azotés, minéraux, contenant du bore, ou du phosphore. Ces additifs sont dit **réactifs** lorsqu'ils sont introduits lors de la synthèse du polymère, sinon ce sont des molécules neutres vis-à-vis du polymère et introduites par simple mélange [31].

III.1) Mécanismes d'actions des retardateurs de flammes

a) Voie physique

Sous l'effet de la chaleur les additifs peuvent créer un revêtement réfléchissant ou non conducteur de la chaleur pour diminuer le transfert thermique vers le matériau. La dégradation du polymère diminue, ainsi que l'émission des gaz combustibles, et la combustion finit par s'arrêter [31].

L'additif peut jouer un rôle de diluant des émissions de gaz et rendre le mélange en dessous de la limite inférieure d'inflammabilité. Ce type d'additif trouve des applications limitées [31].

Sous l'effet de la chaleur, l'additif peut se dégrader de façon endothermique et contribuer à réduire le bilan calorifique. La combustion est retardée par ce mécanisme. Le trihydroxyde d'aluminium utilise ce principe de fonctionnement [31].

b) Voie chimique

Le mode d'action par voie chimique utilise le caractère réactif des radicaux formés lors de la dégradation thermique ou ceux de la flamme. Des oxydes métalliques captent les radicaux actifs HO \cdot et diminuent leurs réactivités [31].

Les radicaux chauds de la flamme, H \cdot et HO \cdot , sont susceptibles d'être captés par des radicaux d'halogènes X \cdot générés par des retardateurs de flammes halogénés. Le but est de créer des radicaux moins énergétiques [31].

III.2) Retardateurs de flammes aux halogènes

Les retardateurs de flammes halogénés agissent par voie chimique. Les composés bromés et chlorés sont utilisés (le fluor et l'iode donnent des composés peu efficaces). Le mode d'action correspond à l'interception des radicaux chauds de la flamme par l'acide halohydrique correspondant [31].

a) Mécanisme d'action

La première étape est la génération des espèces actives



La combustion crée des radicaux au sein du matériau, ces radicaux propagent la combustion suivant les réactions suivantes :



Les radicaux chauds sont inhibés par les hydracides :



La dernière étape régénère les espèces actives :



Les réactions d'inhibition (3.11) et (3.12) ont des énergies d'activation inférieures à celles des réactions de propagation (3.6), (3.7), (3.8) et (3.9). Les réactions d'inhibition sont donc prioritaires. Les réactions de formation (3.5) et de régénération (3.12) doivent être plus rapides que celles qui commandent les réactions d'abstraction aux polymères (3.9). L'acide halogéné est régénéré et agit donc à la manière d'un catalyseur [31].

b) Exemples de retardateurs de flammes bromés

Ce sont les composés halogénés de loin les plus utilisés. Ils sont utilisés sous forme réactive (en copolymérisation ou polycondensation) afin d'être incorporés à la chaîne du polymère, ou bien ils sont simplement mélangés au polymère [31].

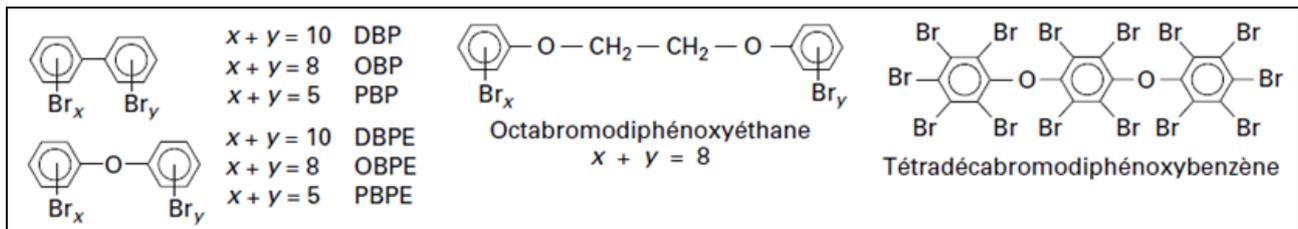


Figure 3.7 : Molécules aromatiques bromées utilisables comme additifs [31]

La figure 3.7 illustre des composés bromés aromatiques utilisables comme additifs. Les molécules en haut à gauche de la figure sont des diphényles. Elles sont de types deca (DBP), octa (OBP) ou pentabromodiphényles (PBP). Les molécules en bas à gauche sont des variantes des polybromodiphényles, une liaison éther lie les cycles aromatiques, ce sont les deca (DBPE), octa (OBPE) et pentabromodiphényléther (PBPE). Les autres molécules de la figure ont des structures similaires avec plus de liaisons éthers [31].

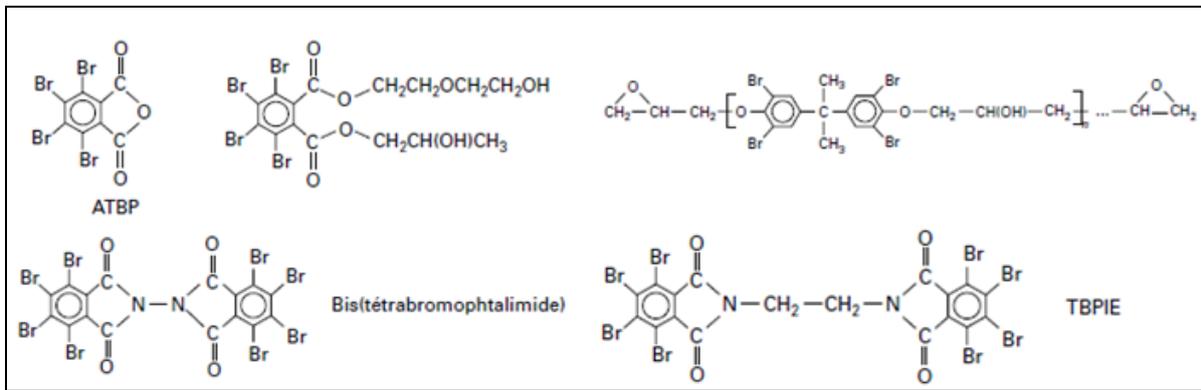


Figure 3.8 : Molécules aromatiques bromées utilisables comme additifs réactifs [31]

La figure 3.8 illustre des molécules bromées introduites par copolymérisation dans la chaîne du polymère. Ces molécules sont composées d'au moins un noyau aromatique avec une fonction organique réactive de type anhydrite, comme l'anhydrite tétrabromophtalique (ATBP), ou alcool lorsque l'anhydrite est estérifié par des diols (molécules en haut au milieu). La fonction réactive peut être de type époxyde comme dans la molécule en haut à droite de la figure 3.8. La fonction réactive peut aussi être un imide comme pour le bis(tétrabromophtalimide) et le bis(tétrabromophtalimide) d'éthylène (TBPIE). Enfin de nombreux autres monomères aromatiques bromés sont utilisés en copolymérisation [31].

Les retardateurs bromés peuvent se trouver sous forme de molécules aliphatiques. Ils sont utilisés comme additifs non réactifs. Exemple de l'hexabromocyclododécane (HBCD) et de l'éthylène-bis(dibromonorbornane-dicarboxyimide) présentés en figure 3.9 [31].

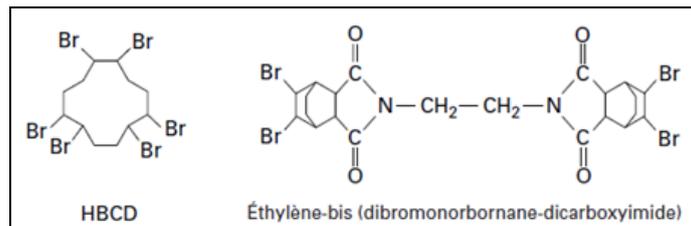


Figure 3.9 : Molécules bromées aliphatiques retardateur de flamme [31]

c) Exemples de retardateurs de flammes chlorés

Ce sont généralement des hydrocarbures chlorés. Ils sont plus stables que les composés bromés mais moins efficaces, d'où des taux d'incorporation plus élevés [31].

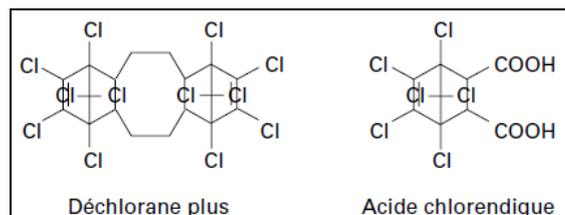


Figure 3.10 : Retardateurs de flammes chlorés [31]

La figure 3.10 illustre des composés chlorés retardateurs de flammes de type aliphatique. La stabilité thermique des hydrocarbures chlorés est généralement jusqu'à 220°C et jusqu'à 260°C pour les aliphatiques. Les aromatiques chlorés ne sont plus utilisés car moins efficaces que les bromés [31].

Une synergie entre l'oxyde d'antimoine Sb_2O_3 et les halogènes sont à remarquer. Seul dans la formulation d'un polymère, l'antimoine n'a aucun effet retardateur de flamme. Pourtant, en présence des composés halogénés, il améliore leurs performances [31].

d) Formulation des polymères

Le taux d'incorporation des retardateurs de flamme halogénés varie entre 8% et 27%, suivant la nature du polymère et la nature du retardateur de flamme. L'incorporation de l'antimoine varie entre 4% et 11%. Les taux d'incorporations sont élevés [31].

Polymère	Retardateur et %	Sb_2O_3 (%)
HIPS	DPBE 12	4
HIPS	Paraffine chlorée 24	12
PP	DPBE 23	8
PP	TBPIE 27	8

Le tableau 3.5 montre des formulations de polymères offrant le même résultat aux tests d'incendies. Sur le polystyrène choc (HIPS), la paraffine chlorée est utilisée dans des proportions doubles à celles de la decabromodiphényléthers (DPBE en figure 3.7), et de plus, le taux d'antimoine est trois fois plus important. Pour le polypropylène, même les retardateurs bromés sont utilisés à des taux élevés de 23% et 27% avec un taux fixe d'antimoine de 8%.

III.3) Les retardateurs de flammes azotés

Ces retardateurs sont peu nombreux et généralement utilisés dans les polycondensats plutôt que les polymères vinyliques. Leur mode d'action physique agit en tant que diluant des gaz combustibles.

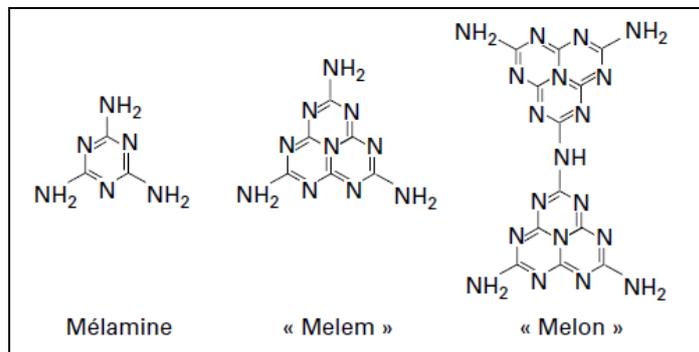


Figure 3.11 : Exemples de molécules retardateurs de flamme azotées [31]

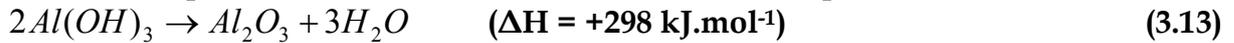
Les molécules en figure 3.11 sont utilisées pour retarder les flammes. La mélamine est la base des structures cyclique condensée « melem » et « melon ».

III.4) Les retardateurs de flammes inorganiques ou minéraux

Leur mode d'action est physique. Sous l'effet de la chaleur, ces molécules se décomposent de façon endothermique, ce qui diminue la température du matériau et donc sa vitesse de dégradation. La décomposition de ces retardateurs libère aussi des gaz de type H₂O ou SO₂, ces gaz contribuent à la dilution des gaz combustibles et forme un écran à la pénétration de l'oxygène vers la surface du matériau [31].

a) Trihydrate d'aluminium

Il se décompose entre 80°C et 200°C suivant la réaction qui suit :



Comme le montre la réaction (3.13), la décomposition de l'hydroxyde d'aluminium est fortement endothermique et produit de l'eau. Le mode d'action résulte d'un processus complexe. L'endothermie refroidit le matériau et donc la production des gaz combustibles, l'eau dilue les gaz combustibles et l'alumine formée crée une croûte protectrice en surface du matériau.

La déshydratation complète est difficile même si elle débute à 80 °C par la formation de l'hydrate Al₂O₃.2H₂O ; elle est très lente et perd toute son eau vers 1200 °C. A des températures inférieures à 1000 °C la déshydratation reste réversible.

L'utilisation de l'hydroxyde d'aluminium se fait pour des polymères dont la température de mise en œuvre est inférieure à 190 °C. Par exemple pour les polyoléfinés (PE, PP...) et le PVC [31].

b) L'hydroxyde de magnésium

L'hydroxyde de magnésium Mg(OH)₂ se décompose à la manière de l'hydroxyde d'aluminium mais à des températures plus élevées de l'ordre de 250 °C à 300 °C. Ces températures de décompositions plus élevées, permettent son utilisation pour des polymères ayant des températures de mise en œuvre supérieures (par exemple le PP). La surface finale de l'oxyde de magnésium contribue à diminuer le taux des fumées. Dans le PP, il est incorporé à des taux élevés de 65% pour avoir des propriétés intéressantes. Ce taux de charges implique des pertes au niveau des propriétés mécaniques [31].

c) Synergie avec des argiles modifiées

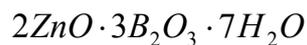
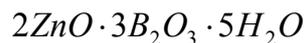
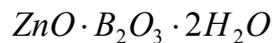
D'après [32], une synergie avec des organoargiles (argile montmorillonite modifiée) permet de diminuer le taux d'incorporation de ces retardateurs. L'emploi de 5% de nanoargile permet de diminuer le taux de l'hydroxyde d'aluminium de 65% à 15%.

III.5) Retardateurs de flammes contenant du bore

Ce sont généralement des mélanges de borate de sodium ou de zinc avec de l'acide orthoborique. Leur mode d'action physique s'apparente à celui de l'hydroxyde d'aluminium.

Le borate de sodium est de formule $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, il est utilisé en solution en présence d'acide borique H_3BO_3 .

Les borates de zinc se présentent sous formes de nombreux hydrates :



Des effets de synergie sont observés entre les borates de zinc et les hydrates de magnésium ou aluminium. Le borate de zinc peut remplacer l'antimoine dans des formulations de PVC. Leurs utilisations se font aussi pour les polyoléfines, le caoutchouc, certains polyesters... [31].

III.6) Les systèmes intumescents

Ces systèmes gonflent sous l'effet de la chaleur. Le matériau est alors protégé de la chaleur par une couche alvéolaire à faible conductivité thermique. Le second effet de cette couche est de diminuer la vitesse de diffusion des gaz combustibles formés.

Le système est composé d'une source d'acide inorganique (sulfurique, phosphorique, borique...) ou des précurseurs d'acides (phosphate d'urée, phosphate de mélamine, phosphates acides d'ammonium, borates d'ammonium...).

Le second composant du système est un composé hydroxylé susceptible de se déshydrater comme la cellulose, l'amidon, des sucres (arabinose, maltose...)...

Le dernier composant est un générateur de gaz facilitant l'expansion. La mélamine, la guanidine et l'urée génèrent des gaz d'ammoniac, d'eau et de dioxyde de carbone. La paraffine chlorée et le caoutchouc chloré libèrent HCl

Un liant peu compléter ce système si le polymère lui-même n'offre pas les capacités de créer une peau qui empêche les gaz de s'échapper.

Il existe évidemment d'autres retardateurs de flammes que ceux détaillés ici. Les nouvelles normes et législations sont d'autant plus exigeantes sur le caractère inflammable des polymères mais aussi sur les propriétés toxiques, corrosives et des densités des fumées [31].

IV. Formulation des polymères résistants aux incendies

Comme nous l'avons vu, les polymères sont des combustibles et leurs fumées peuvent être toxiques, corrosives ou denses. Pour la conception des câbles, des matériaux résistants aux flammes et avec des fumées non corrosives sont parfois demandés. Parfois, de faibles émissions de fumées sont exigées.

Les composants d'un matériau plastique sont diverses et variées : les charges, les antioxydants, les plastifiants etc. Lors de la formulation du polymère, il faut tenir compte de tous ces composants afin de prévoir son comportement vis-à-vis des flammes.

IV.1) Choix du polymère

Les polyoléfines de type PE ou PP sont des matériaux intéressants car ils ne dégagent pas de fumées corrosives, à l'inverse du PVC qui dégage de fortes quantités d'acide chlorhydrique. L'inconvénient des PE et PP c'est qu'ils sont facilement inflammables. Leurs usages passent donc par l'emploi d'un adjuvant retardateur de flamme [33].

IV.2) Choix des retardateurs de flammes

Le retardateur de flammes utilisé doit rendre les polyoléfines plus résistantes aux flammes sans ajouter de composés toxiques ou corrosifs dans les fumées. Le retardateur de flammes doit permettre dans certains cas d'abaisser la quantité des fumées. Pour ce type d'utilisation les retardateurs de flammes halogénés sont à proscrire [33].

IV.3) Dénomination

Suivant leurs propriétés, les formulations sont dites **HFFR** pour **H**alogen **F**ree **F**ire **R**etardant, **LSZH** pour **L**ow **S**moke **Z**ero **H**alogen ou bien **LSZHFR** pour **L**ow **S**moke **Z**ero **H**alogen **F**ire **R**etardant... Ces dénominations apparaissent généralement sur le marquage des câbles.

IV.4) Législation

La réglementation française prévoit un classement des matériaux suivant leurs **réactions au feu** et leurs **résistances au feu**. La réaction caractérise l'impact d'un matériau sur un incendie (incombustible, combustible, inflammable). La résistance au feu caractérise la durée pendant laquelle, le matériau soumis à l'incendie continue de jouer le rôle qui lui est dévolu [29].

a) Réactions au feu

Le **classement M** de réaction au feu de la réglementation française [29] :

- **M0** : matériaux incombustibles, ils n'alimentent pas l'incendie.
- **M1** : matériaux combustibles mais non inflammables, ils ne propagent pas les flammes.
- **M2-M3-M4** : matériaux combustibles et inflammables. L'inflammabilité augmente de M2 à M4.

Les essais européens normalisés précisent les « **Euroclasses** ». En plus des classes M la réglementation tient compte du risque de flash over, des propriétés des fumées et des gouttes inflammables formées [29].

Les matériaux classés Euroclasses **A1**, **A2** et **B** sont peu combustibles et ne provoquent pas de flashover. Les Euroclasses **C**, **D** et **E** sont des combustibles qui peuvent provoquer des flashovers. Les Euroclasses **F** sont les matériaux ne pouvant être testés. Pour les classements A2 à D l'opacité des fumées est prise en compte. La formation de gouttes inflammables est prise en compte pour les classes A à E. **Il n'y a pas de relation ou d'équivalence entre les classements M et les Euroclasses** [29].

b) Résistance au feu

D'après [29] **La réglementation française** classe les matériaux en trois catégories de résistances :

- **SF (Stable au Feu)** : Résiste mécaniquement aux flammes
- **PF (Pare-Flamme)** : Etanche aux flammes et aux gaz combustibles
- **CF (Coupe-Feu)** : Isole thermiquement des flammes en supplément

Ces classements sont liés à des durées normalisées de 15 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 240 min et 360 min [29].

La réglementation européenne remplace les lettres **SP**, **PF** et **CF** par **R**, **E** et **I**. Elle définit et utilise aussi d'autres critères pour certains types de produits :

- **W** : rayonnement (maximum 15 kW.m⁻²)
- **S** : étanchéité aux fumées froides
- **D** : concerne les cartons de désenfumage
- **F** : concerne les ventilations de désenfumage
- **B** : concerne les exutoires de fumées
- **PH** : concerne les câbles électriques.

Avec la réglementation européenne, des similitudes existent pour la résistance au feu :

- Un poteau SF 1h devient un poteau R 60
- Un porte PF 1/2h devient une porte E 30
- Un mur CF 1h30 devient un mur REI 90

L'**International Electric Commission (IEC)** instaure des essais standards pour tester le comportement des câbles durant un incendie. Ces essais tentent de lier la théorie complexe de la combustion à des essais simples à effectuer dans le laboratoire, pour quantifier les phénomènes. Le chapitre suivant détaille les installations des essais

V. Conclusion

La combustion est une réaction chimique complexe. Les paramètres qui impactent la combustion sont importants. Une synergie entre le carburant, le comburant et la source d'ignition donne naissance à la combustion. Lors de la combustion d'un solide, sous l'effet de la chaleur, des gaz de pyrolyse se forment. Pour maintenir sa combustion, le matériau qui brûle doit être fourni en comburant (généralement O₂) et surtout offrir une énergie suffisante pour enflammer à son tour les gaz de pyrolyse.

Afin de lutter contre l'inflammation des matériaux, il existe des produits qui limitent l'inflammabilité des polymères. Ces retardateurs de flammes agissent en limitant la vitesse de combustion mais sans rendre le matériau totalement incombustible. Leurs modes d'action principale consistent à diluer les gaz de pyrolyse ou à absorber l'énergie de la combustion.

L'étude théorique de la combustion nécessite des appareils pointus et la prise en compte de tous les paramètres. Pour les essais de combustion des câbles, le laboratoire utilise des appareillages pour réaliser les essais suivant les articles standards du IEC. Les essais donnent des résultats quantitatifs et permettent de comparer le pouvoir inflammable des différents câbles.

CHAPITRE 4 : MISE EN SERVICE DU LABORATOIRE D'ESSAIS INCENDIE

Le chapitre 3 montre le caractère inflammable des câbles, et met en évidence la nécessité d'utiliser des matériaux résistants aux flammes. NEXANS produit depuis de nombreuses années des câbles résistant aux flammes, dans l'optique du contrôle de la qualité de ses produits, le site de TUZLA s'équipe d'un laboratoire capable de réaliser les principaux essais de combustion des câbles ou de leurs matières premières. Au début du stage, l'emplacement du laboratoire était défini, les appareils de mesures étaient placés et quelques aménagements minimes avaient débuté. C'est dans un environnement quasiment vierge de tous travaux que débute le stage.

Un laboratoire, quel qu'il soit, exige un environnement particuliers où la minutie, l'ordre et l'efficacité font partie de l'espace. Afin d'évoluer dans un laboratoire agréable, avec une disposition réfléchiée des différents éléments, le laboratoire sera aménagé dans cet optique. Le but est un environnement de travail permettant l'efficacité, l'hygiène et la sécurité. Les essais, auxquels sont soumis les câbles, sont dictés par les articles des standards internationaux du IEC. Les appareils de mesures, provenant de Suisse, doivent être raccordés, testés puis validés avant leurs utilisations. Une fois que tout est prêt, la formation des opérateurs à la réalisation des essais est un point important, du personnel formé doit faire vivre le laboratoire.

Ce chapitre montrera comment, durant ce stage, les différentes étapes des travaux ont permis la mise en service de ce laboratoire.

I. Configuration de l'espace

En Mai 2009, le site de TUZLA s'est muni d'instruments destinés aux essais incendies pour câbles et matières premières. Cette première partie présentera l'environnement général de travail et les premiers aménagements réalisés.

I.1) Plan du laboratoire et instruments à dispositions

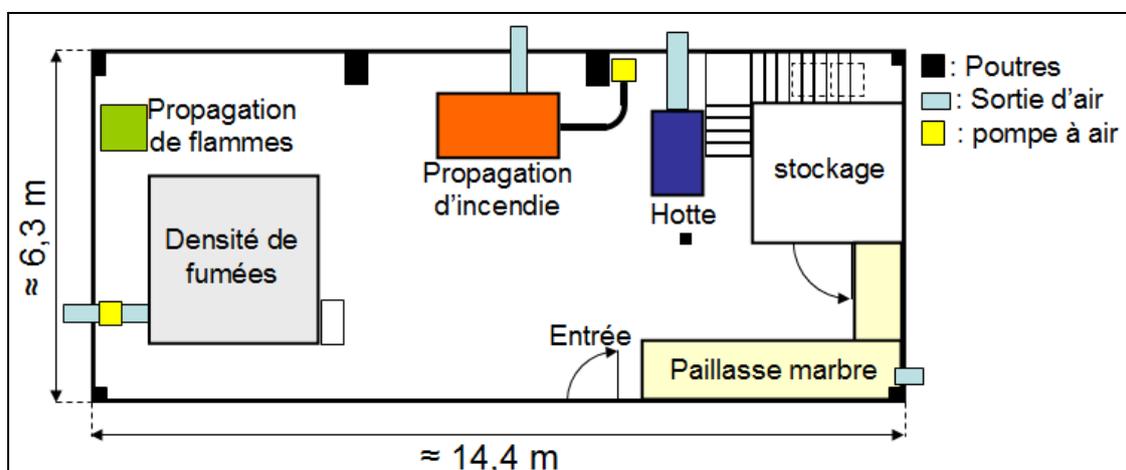


Figure 4.1 : Plan au sol initial du laboratoire (novembre 2009)

La figure 4.1 illustre la vue de dessus du laboratoire d'essais incendie. La surface au sol est environ de 90 m² et la hauteur est d'environ 6 m. Les essais qui doivent être réalisés dans ce laboratoire sont :

- La propagation d'incendie (IEC-60332-3)

- La densité de fumées (IEC-60134)
- La propagation de flammes (IEC-60332-1)
- La résistance aux incendies (IEC-60331)
- L'analyse de corrosivité des fumées (IEC-60754-1 et IEC-60754-2)
- La mesure d'Indice d'Oxygène

Les instruments destinés aux essais de densité de fumées et de propagation d'incendie sont figés. Les paillasse en marbre sont destinées aux essais de corrosivité des fumées et à l'essai de résistance aux incendies. L'essai de propagation de flamme se trouve sur un chariot, il est symbolisé sur le plan par un carré vert en haut à gauche.

Des escaliers autour de la zone de stockage mènent à un bureau d'environ 20 m².

I.2) Détection des besoins généraux et aménagements

L'analyse de l'espace de travail met en évidence, dans un premier temps, la nécessité d'installer un dispositif d'éclairage et des radiateurs dans le laboratoire. Dans un second temps, il faut acquérir des paillasse supplémentaires. Ces paillasse seront utiles pour réaliser les pesées et préparer les échantillons ou les produits d'usages, de plus le laboratoire ne possède pas d'évier alors que plusieurs essais utilisent des solutions et de la verrerie. Un système de ventilation est un autre besoin détecté dans ces premières périodes. La hotte est placée trop près du mur, la canalisation d'air liée à l'installation de propagation d'incendie gêne son utilisation.

L'espace de travail est modifié tant que possible pour offrir un environnement ergonomique.

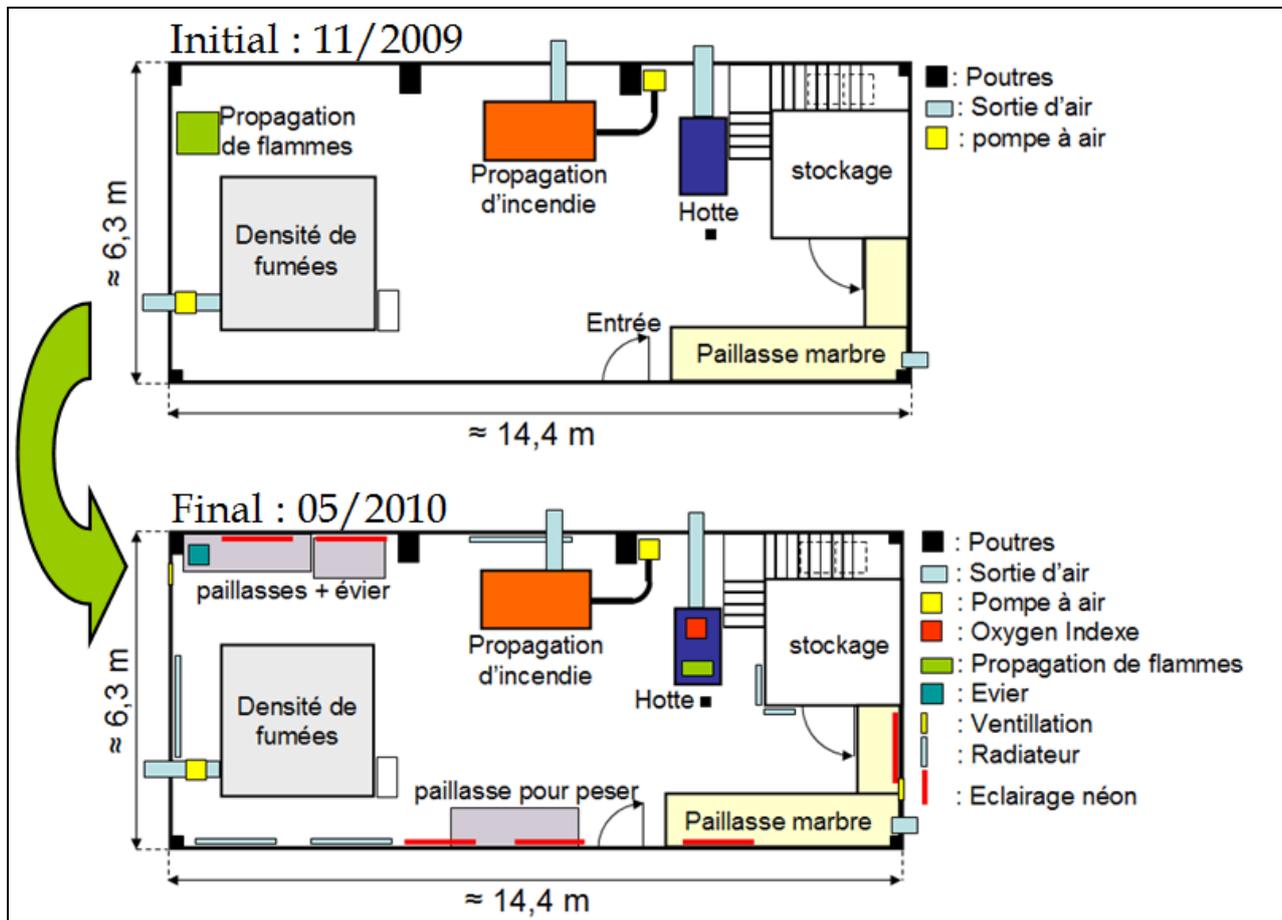


Figure 4.2 : Plans au sol du laboratoire avant et après les aménagements

Le plan de la figure 4.2 montre les différents aménagements réalisés. On peut y observer le plan initial du laboratoire en haut et le plan final après les aménagements en bas. Des travaux ont permis d'équiper le laboratoire de six systèmes de lampes au néon et de 11 mètres de radiateurs. Trois paillasse supplémentaires sont installées, l'une est munie d'un évier, une autre sert pour réaliser les pesées et l'étuvage, et la dernière sert pour préparer les échantillons (à côté de la paillasse avec évier). La hotte est écartée du mur, ainsi la conduite, qui relie la pompe à air et la cabine de propagation d'incendie, ne gêne plus l'utilisation de la hotte. L'aménagement de l'intérieur de la hotte permet d'y introduire l'appareillage de mesure pour l'Oxygene Index, ainsi que la cabine pour l'essai de propagation de flamme.

Une fois aménagé, l'espace présente plus de matériels à disposition. La disposition de ces nouveaux éléments est réalisée afin d'offrir un espace de travail ergonomique et permettant une réalisation pratique des essais.

II. Configurations et besoins des installations

Le laboratoire est muni de plusieurs appareils de mesures. Ces appareils doivent tout d'abord être installés. Pour cela, les besoins techniques et de raccordement sont listés pour chaque appareil, avant que les travaux soient réalisés. Les aspects sécuritaires sont pris en compte lors des aménagements.

II.1) Propagation de Flamme essais IEC 60332-1 et IEC 60332-2

L'essai de propagation de flammes se fait sur un tronçon de câble suspendu verticalement. A l'aide d'un brûleur, la combustion du câble est initiée dans la partie basse de l'échantillon. Au bout d'une durée, fonction du diamètre du câble, le brûleur est retiré. La flamme se propage verticalement le long du câble, lorsque la flamme s'éteint, la partie du câble brûlé est mesurée. Suivant la section ou la nature du conducteur, l'essai est réalisé suivant les articles des standards IEC 60332-1 ou IEC 60332-2 [34 ; 35 ; 36 ; 37].

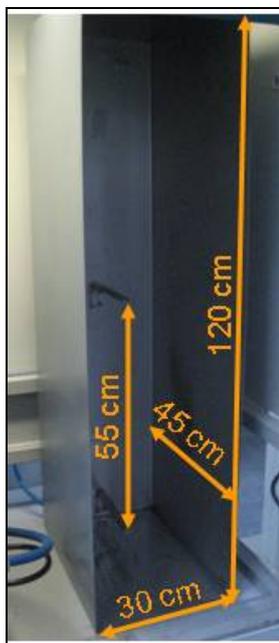


Figure 4.3 : Cabine d'essais

Dans les deux cas les essais sont réalisés dans une cabine dont les dimensions sont données dans les standards [34 ; 36]. Cette cabine a été réalisée par l'équipe de maintenance, elle est illustrée en figure 4.3. La cabine est équipée d'éléments d'attaches supérieurs et inférieurs. Ils sont distants de 55 cm pour fixer le tronçon de câble de $60 \pm 2,5$ cm, au centre et dans la partie inférieure de la cabine.

Ce qui différencie les essais ce sont les sources de combustion. Pour l'essai IEC60332-1, la flamme du brûleur est réalisée avec un pré-mélange d'air et de propane. Pour l'essai IEC 60332-2 la flamme est de type diffusion avec seulement du propane [36].

a) Essai de propagation de flamme sur câbles ou fil élémentaires IEC 60332-1 : flamme de 1 kW

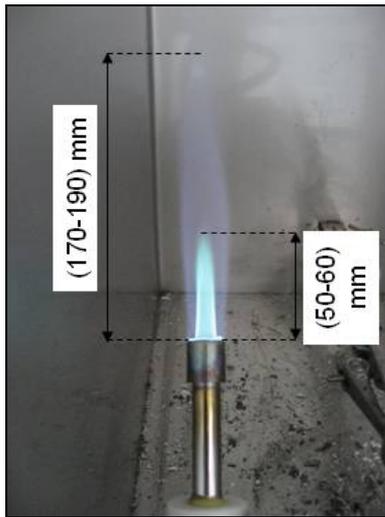


Figure 4.4 : Flamme de 1kW pré-mélange d'air et de propane

La figure 4.4 illustre la flamme pré-mélangée de 1 kW pour réaliser l'essai. Les débits de propane et d'air sont respectivement calculés à 650 ml.min^{-1} et 10 l.min^{-1} par le standard [37]. En plus des débits, cette flamme est contrôlée par une méthode standard détaillée en [38].

Cet article standard [38] définit les dimensions présentes sur la figure 4.4 et propose une méthode pour valider l'énergie de 1 kW émise par la flamme. Le contrôle de la flamme est réalisé à l'aide d'un bloc de cuivre standardisé (cylindre d'environ 10 g.). Sous 1 kW, ce bloc doit s'échauffer de 100 °C à 700 °C en 45 secondes.

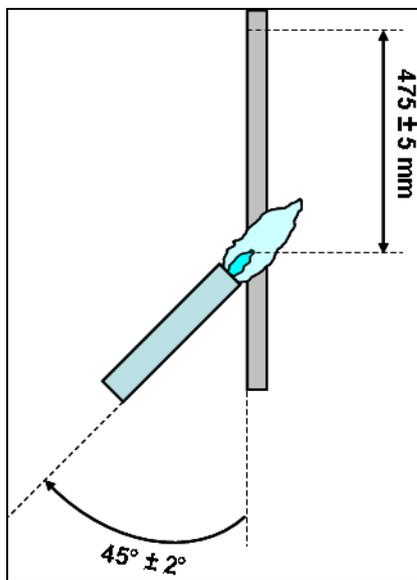


Figure 4.5 : Positionnement du brûleur [35]

Comme le montre la figure 4.5, le brûleur doit créer un angle de $45 \pm 2^\circ$ avec le câble. Le cône bleu de la flamme est en contact avec la surface du câble à une distance de $475 \pm 5 \text{ mm}$.

Les durées d'exposition de la flamme sont fonction du diamètre du câble, elles sont données en tableau 5.1.

Tableau 4.1 : Durée d'exposition du câble à la flamme de 1 kW [35]

Diamètre du câble (mm)	Durée d'exposition (seconde)
$D < 25$	60 ± 2
$25 < D < 50$	120 ± 2
$50 < D < 75$	240 ± 2
$D > 75$	480 ± 2

b) Essai de propagation de flamme sur fils élémentaires fins ou fibres optiques IEC60332-2 : flamme de diffusion



Figure 4.6 : Flamme de diffusion au propane

Lorsque l'échantillon est un fil élémentaire dont la section de l'âme est inférieure à $0,5 \text{ mm}^2$ ou que le conducteur est une fibre optique, l'essai est réalisé avec une flamme de diffusion illustré en figure 4.6. Le brûleur n'utilise qu'une alimentation en propane [36]. Le débit de propane est fixé pour obtenir une flamme de hauteur égale à $125 \pm 25 \text{ mm}$ [37].

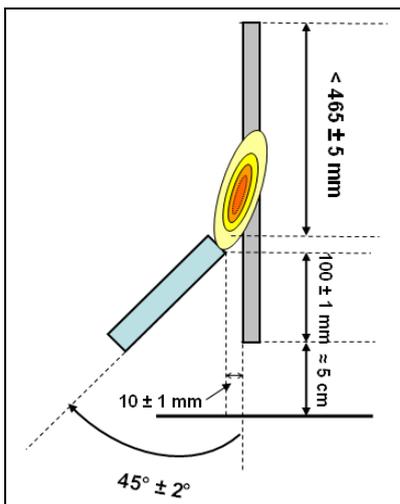


Figure 4.7 : Positionnement du brûleur [37]

Pour un câble à fibres optiques, l'échantillon est fixé aux attaches supérieures et inférieures de la cabine [37].

Pour un fil élémentaire à conducteur métallique, l'attache est réalisée seulement sur la partie haute et un poids est accroché à la base du fil. Ce poids est fonction de la section de l'âme, sa valeur est de $5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ [37].

Le brûleur est positionné suivant la figure 4.7. Le brûleur crée un angle de $45 \pm 2^\circ$ avec la surface de l'échantillon. La pointe du brûleur se trouve à 100 mm du bout inférieur de l'échantillon et 10 mm de sa surface [37].

La durée d'exposition du câble à la flamme est de 20 secondes [37].

c) Résultat et validité de l'essai

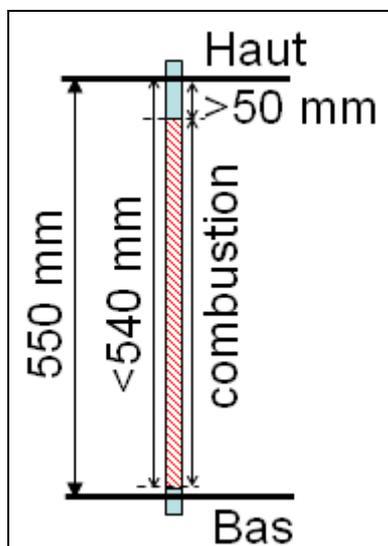


Figure 4.8 : Conformité du câble et validité de l'essai [64 ; 66]

Comme le montre la figure 4.8, le câble ou le fil élémentaire testé est conforme au standard, si la combustion s'arrête d'elle-même et à une distance supérieure à 50 mm de l'attache haute.

La propagation doit être du bas vers le haut, si elle s'est fait de haut en bas et que la partie inférieure de l'échantillon brûle jusqu'à une distance inférieure à 10 mm de l'attache basse, l'essai n'est pas conforme.

Si un échantillon n'est pas conforme, un second test est réalisé. Si le second test est conforme, un troisième essai doit valider la conformité [35 ; 37].

d) Installation de l'appareil, raccordements et besoins

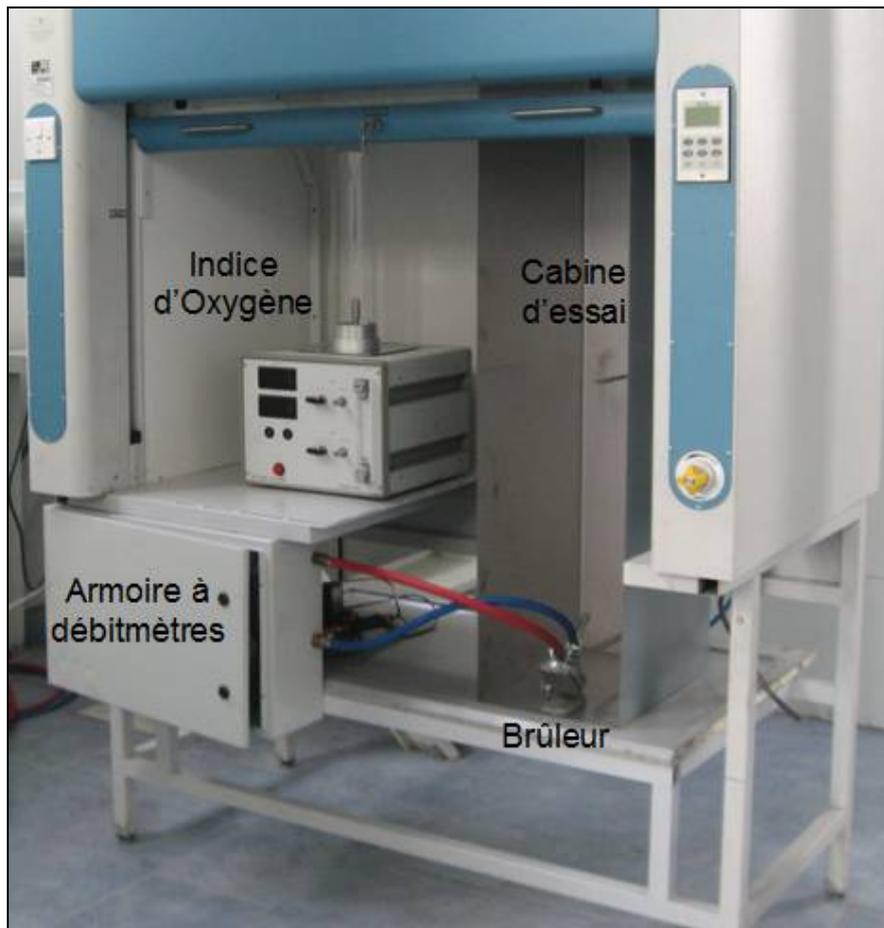


Figure 4.9 : Installation pour les essais de propagation de flamme.

Pour un gain de place et une utilisation optimum de l'espace, l'installation de propagation de flamme est placée sous la hotte. Sous cette hotte se trouve aussi l'essai de mesure d'Indice d'Oxygène (I.O.). La figure 4.9 illustre l'installation. Pour arriver à faire tenir les deux essais sous la même hotte, l'équipe de maintenance a été sollicitée. En effet, l'architecture métallique de la hotte a été complètement modifiée sur sa partie basse. Des opérations de découpe et de soudure ont permis de baisser la hauteur de l'établi pour rentrer la cabine d'essai dans la hotte. L'armoire à débitmètre est fixée sur la gauche de la hotte. Une étagère métallique est soudée à l'armoire à débitmètres pour soutenir l'essai d'I.O.

Pour l'essai de propagation de flamme, une source de propane et une source d'air comprimé doivent être reliées à l'installation. Une canalisation achemine le propane depuis les bouteilles situées en dehors du laboratoire jusqu'à l'armoire à débitmètres. Une canalisation achemine l'air comprimé depuis une source située dans le laboratoire jusqu'à cette même armoire. Dans les deux cas, les canalisations qui acheminent ces fluides sont placées de façon à ne pas engendrer des risques de sécurité, elles passent par le haut de la cabine dans un chenal sécurisé. Ce chenal emprunte un chemin éloigné des sources de chaleurs.

Cet essai consomme essentiellement du propane, un contrôle régulier du niveau dans les bouteilles doit être réalisé afin de passer une commande dans les temps.

II.2) Densité de fumées, essai IEC-61034

Cet essai mesure la densité des fumées émises durant la combustion des câbles par une solution d'alcool. Le standard IEC61034-1 [39] détaille l'appareillage d'essai et le standard IEC61034-2 [40] détaille la réalisation de l'essai.

a) Appareillages

L'essai est réalisé dans une cabine cubique de 27 m³ (3m×3m×3m). Un faisceau lumineux traverse la cabine sur son axe médian comme le montre la figure 4.10. Le faisceau est émis par une source lumineuse (lampe halogène) et le récepteur (sélénium ou silicium) doit être conforme au standard [40]. L'émetteur et le récepteur se trouvent à environ 2 mètres du sol et derrière des vitres.

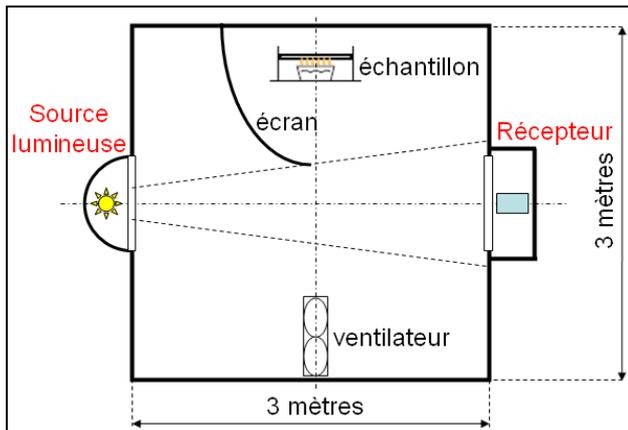


Figure 4.10 : Cabine pour densité de fumées en vue de dessus

Un ventilateur est placé dans la cabine pour assurer l'homogénéisation des fumées. Le débit d'air généré par le ventilateur doit être de 7 à 15 l.min⁻¹.

L'échantillon est placé sur le côté opposé au ventilateur. Un écran métallique protège l'échantillon et la source de combustion du courant d'air du ventilateur.

Le rayon lumineux forme un cercle d'environ 1 mètre de diamètre sur la face où se trouve le récepteur.

b) Réalisation de l'essai

L'échantillon est composé de tronçons de câbles de 100±5 cm. Suivant le diamètre des câbles, le nombre de tronçons varie. Le tableau 4.2 donne le nombre de tronçons pour l'échantillon en fonction du diamètre.

Tableau 4.2 : Nombre de tronçons de câbles pour l'échantillon [40]

Diamètre du câble (mm)	Nombre de tronçons de câble
$D > 40$	1
$20 < D \leq 40$	2
$10 < D \leq 20$	3
$5 < D \leq 10$	N_1
Avec $N_1 = \frac{45}{D}$ arrondi à l'entier inférieur	

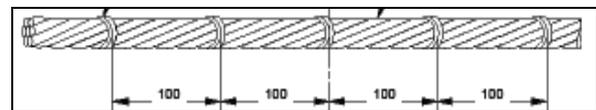


Figure 4.11 : Faisceau de câbles fins [40]

Pour les câbles de diamètres inférieurs à 5 mm, les tronçons sont assemblés par 7 en faisceaux comme sur la figure 5.11. Le nombre de faisceaux est $N_2 = \frac{45}{3D}$ et est arrondi à l'entier inférieur.



Figure 4.12 : Combustion de l'échantillon

L'échantillon est disposé dans la cabine comme sur la figure 4.12. Sous l'échantillon une solution alcoolique de 1 litre est disposée dans un bac métallique. La solution d'alcool est normalisée et composée de 90% d'éthanol, 4% de méthanol et 6% d'eau (% volumique). Après étalonnage du récepteur (calibration du 0% et 100% de lumière), la combustion de l'alcool est initiée comme sur la figure 4.12 et l'enregistrement des mesures commence.

c) Mesure de la densité de fumées

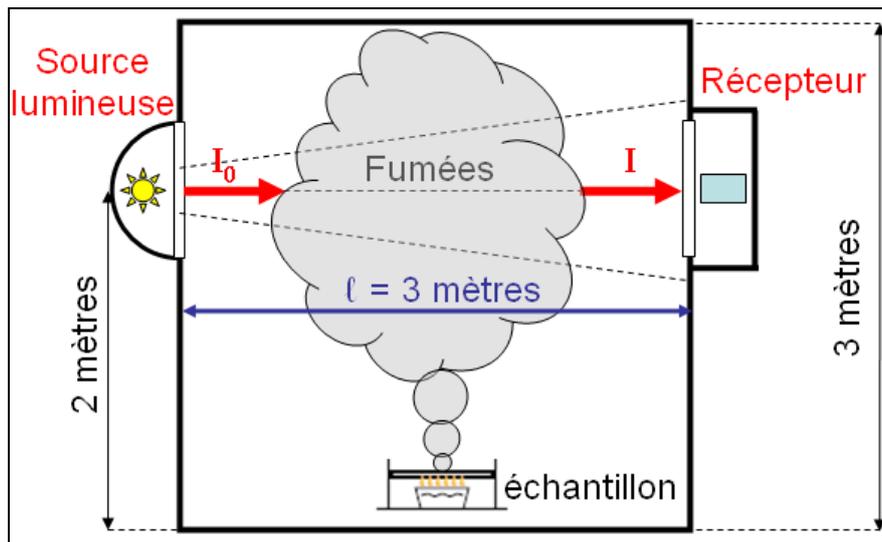


Figure 4.13 : Mesure de l'intensité lumineuse transmise à travers les fumées

La figure 4.13 illustre la configuration du système durant l'essai. La cabine renferme les fumées émises par l'échantillon. La lumière traverse les fumées et son intensité est mesurée par un capteur. Les mesures sont enregistrées en fonction du temps à l'aide d'un logiciel.

La mesure optique réalisée dérive de la loi de Bouguer [40] (Beer-Lambert-Bouguer).

$$k_{ext} = \frac{1}{l} \times \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Avec,

k_{ext} le coefficient d'extinction linéaire népérien m^{-1}

l la longueur du trajet optique m

I_0 l'intensité du flux lumineux émis par la source $J.s^{-1}.m^{-2}$

I l'intensité du flux lumineux transmis à travers la fumée $J.s^{-1}.m^{-2}$

Parfois le logarithme en base 10 est utilisé (c'est le cas dans le standard pour les calculs de A_0 et A_c), D est alors coefficient d'extinction décimal.

$$D = \frac{1}{l} \times \log\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Le lien entre k_{ext} et D est établi par :

$$k_{ext} = D \times \ln(10) \quad \text{ou} \quad k_{ext} = 2,303 \times D$$

A partir des coefficients d'extinction, la surface S d'extinction est calculée :

$$S = k_{ext} \times V \quad \text{ou} \quad S = 2,303 \times D \times V$$

Avec

S la surface d'extinction en m^2

V le volume de la chambre contenant la fumée en m^3

La surface d'extinction par mètre de câble est calculée par :

$$S_n = \frac{S}{n}$$

Avec,

S_n la surface d'extinction en m^2 par longueur de câble

n le nombre de tronçons de câbles de 1 m

d) Raccordement, installation, étalonnage et besoin



Figure 4.14 : Cabine d'essai de mesure de densité de fumées

L'installation fournie par la société FTT, représenté en figure 4.14, est un cube de $27 m^3$. Il est implanté dans le laboratoire comme présenté sur la figure 4.1.

La configuration du jeu d'émetteur et récepteur est conforme à l'article du standard IEC-60134-1 [40] :

- Emetteur lampe halogène avec filament en tungstène. Puissance 100 W, tension nominal 12 V.
- Récepteur en silicium.

Le récepteur est relié à l'ordinateur à l'aide d'un câble USB. Un logiciel du FTT appelé CubeCalc version 2.3 est installé dans cet ordinateur, il permet l'acquisition et le tracé des mesures durant l'essai.

L'article du standard exige que le rayon lumineux soit réglé par un système de lentilles pour donner une surface circulaire, uniformément éclairée et de diamètre $1,5 \pm 0,1$ m sur la paroi intérieure opposée. Le réglage des lentilles est réalisé pour obtenir le diamètre souhaité.

Pour assurer un bon réglage du jeu d'émetteur-récepteur, deux filtres étalons sont utilisés. Leurs valeurs sont données par :

$$A_o = \log \frac{(I_o)}{(I)}$$

- Filtre 1 : $A_o = 0,3$ m² soit une transmission de lumière $I = 50\%$
- Filtre 2 : $A_o = 0,6$ m² soit une transmission de lumière $I = 25\%$

Le jeu d'émetteur-récepteur est réglé pour avoir des valeurs à $\pm 5\%$ des valeurs des filtres étalons. Cette fourchette de 5% est donnée par le standard.

En plus des valeurs des filtres étalons, il faut que la cabine passe deux essais de qualification. L'objet de l'essai de combustion de qualification est de vérifier que la fumée produite dans le caisson d'essai donne des valeurs de transmission dans les limites de l'article standard. Pour cela, deux solutions de toluène dans l'éthanol, de concentrations 4% et 10%, sont brûlées dans la cabine. Il faut alors mesurer la transmission de lumière minimum et calculer le paramètre A_c à partir de A_o .

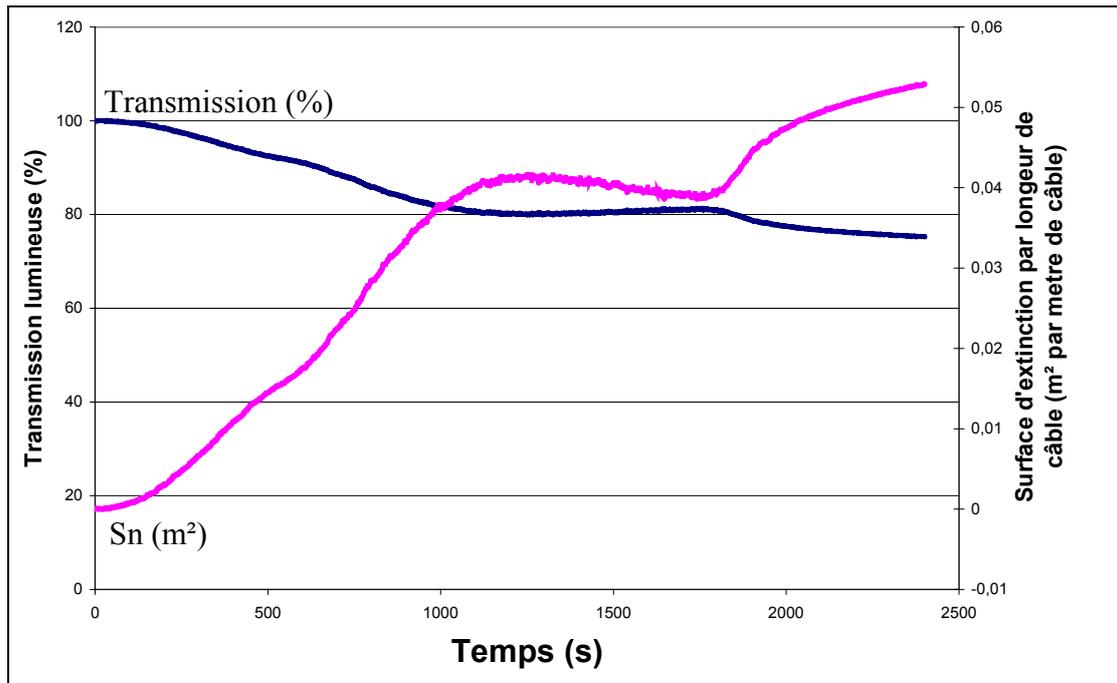
$$A_c = \frac{A_o}{\% \text{toluène}} \times \frac{\text{volume de la cabine (m}^3\text{)}}{\text{longueur du trajet optique (m)}}$$

Pour être conforme au standard, la cabine doit donner les valeurs suivantes :

- **Toluène à 4%** : Surface d'extinction A_c maximum entre **0,18 m² et 0,26 m²**.
- **Toluène à 10%** : Surface d'extinction A_c maximum entre **0,80 m² et 1,20 m²**.

Les solutions de toluène sont brûlées dans la cabine. Les valeurs des paramètres A_c mesurés sont de 0,24 m² pour le toluène à 4%, et 0,95 m² pour le toluène à 10%. Ces valeurs confirment que la cabine d'essai offre des mesures fiables.

Les valeurs de transmission de lumière sont mesurées en pourcentage durant 40 minutes.



Graphique 4.1 : Mesure de la densité de fumées lors de la combustion d'un câble

Le graphique 4.1 montre la mesure de la transmission de lumières et le calcul de la surface d'extinction en fonction du temps. La surface d'extinction est inversement proportionnelle à la transmission de lumière. Pour un câble de diamètre supérieur à 80 mm, la valeur de transmission minimum doit être normalisée en étant multipliée par un facteur $80/D$ (ou D est le diamètre en mm). Pour qu'un câble soit certifié Low Smoke, la valeur de **transmission de lumière doit être au minimum de 60%** si d'autres exigences ne sont pas données [40].

Pour réaliser l'essai, la source d'énergie est un mélange d'éthanol, méthanol et d'eau. Ce sont les principaux consommables de l'essai, des stocks minimums sont à prévoir afin d'avoir des délais de commande optimums. Le toluène est un autre consommable à prévoir. La réalisation des solutions nécessite de la verrerie. Des éprouvettes graduées, des fioles jaugées et des pipettes sont commandées.

II.3) Essai de résistance des câbles aux incendies IEC 60331

a) Principe de l'essai

Le terme de résistance définit les capacités du câble à garder ses propriétés fonctionnelles durant un incendie. Cet essai consiste à faire circuler un courant dans les différents conducteurs d'un câble et à le soumettre à un incendie. Pour valider l'essai il ne doit pas y avoir de court-circuit pendant et après la combustion [41 ; 42 ; 43].

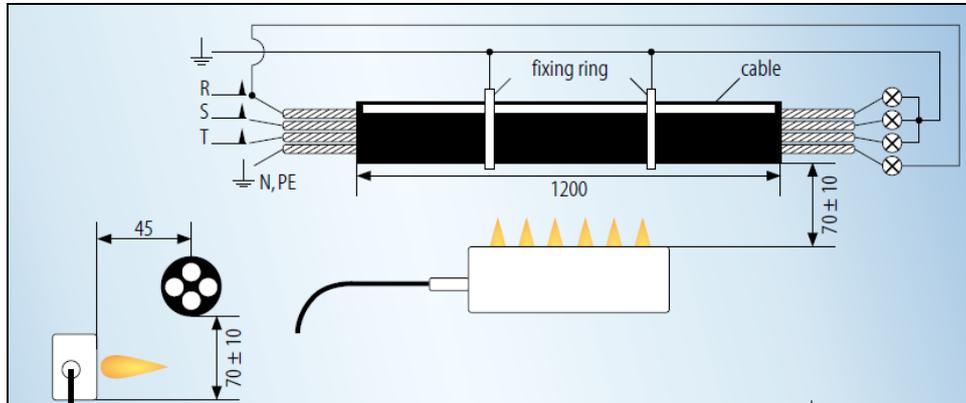


Figure 4.15 : Schéma électrique du montage de l'essai [44]

La figure 4.15 illustre le montage de l'échantillon et son positionnement vis-à-vis du brûleur. La température de la flamme est de 750°C minimum et 800 °C maximum [42]. La durée conseillée de l'essai est de 90 minutes. La tension soumise est la tension assignée du câble jusqu'à 1 kV [42]. Pour les câbles de transmission la tension est de 100 Volt [43].

b) Appareillage

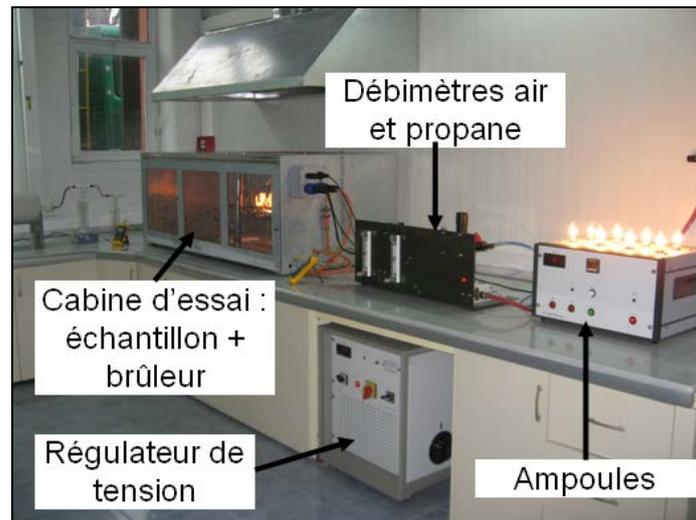


Figure 4.16 : Appareillages d'essais pour IEC 60331

Le type d'appareillage est défini en [41], il est illustré en figure 4.16. Pour réaliser l'essai il faut une source d'électricité réglable, elle est fournie par le régulateur de tension triphasée. La source de combustion est une flamme prémélangée d'air et de propane, les débitmètres contrôlent leurs flux et des thermocouples mesurent la température de la flamme. Des débits d'environ 5 l.min⁻¹ de propane et 80 l.min⁻¹ d'air dans les conditions standards donnent une flamme d'environ 750°C. L'échantillon traversé par le courant est brûlé dans la cabine d'essai. Le courant qui traverse le câble allume des ampoules, si

l'intégrité du circuit n'est pas respectée (court-circuit) au moins une ampoule s'éteint et une alarme sonne.

c) Raccordement des éléments

Comme le montre la figure 4.16, l'installation d'essai est composée de quatre parties :

- La cabine d'essai avec l'échantillon de câble + le brûleur
- Le régulateur de tension
- Les débitmètres
- Le caisson à ampoules

Avec les tensions importantes (jusqu'à 1000 Volt), il existe des sécurités sur l'ensemble de l'installation. Pour un bon fonctionnement les quatre parties sont raccordées entre elles. Ce premier point fut déjà quelque peu laborieux. En effet, les prises qui relient chacune des installations ne sont pas munies de détrompeurs (des prises peuvent être branchées au mauvais endroit). Le manuel d'installation renseigne mal les divers branchements électriques. L'installation avec les branchements corrects est possible grâce à des échanges par mail avec la société FTT. Une fois que l'installation est correctement reliée, une alarme sonne lorsque l'installation est mise sous tension. De là commence une longue série d'échange de mails avec le FTT, les problèmes les plus improbables sont passés au peigne fin. Finalement, on trouve que l'alarme est due à un mauvais réglage d'un composant électronique interne du régulateur de tension. Avec l'aide d'un électricien du site, le régulateur de tension est ouvert, le réglage est corrigé et le problème est résolu.

d) Besoins de l'installation

Pour réaliser les essais il faut une source d'électricité (courant triphasé) ainsi qu'une source de combustible. La partie longue de la paillasse en marbre sert à accueillir l'installation présentée en figure 4.16. Une prise triphasée et le nécessaire électrique sont placés à proximité des paillasses par les électriciens.

Une source de propane et d'air comprimé doit se trouver à proximité de l'installation. Depuis les bouteilles de propane situées à l'extérieur du laboratoire (pour des raisons de sécurité), une canalisation achemine le propane jusqu'à la paillasse d'essai. Cette canalisation doit emprunter un chemin sûr à l'écart des autres sources de chaleurs. Avec les mêmes contraintes, une canalisation, qui achemine l'air comprimé jusqu'à la paillasse d'essai, est installée. L'installation peut alors être connectée aux sources de combustibles et de carburants ainsi qu'à l'électricité.

Les fusibles de 3 Ampères du générateur de tension et les ampoules sont les réels consommables de cet essai. Pour éviter de changer les fusibles lorsqu'un câble n'est pas conforme (fréquent), les fusibles sont remplacés par un organe de disjonction.

II.4) Propagation d'incendie IEC 60332-3

Cet essai est réalisé sur des tronçons de câble montés en nappes sur une échelle. Il vise à mettre en évidence la capacité des câbles à propager un incendie. Il existe 5 catégories pour ce test. Ces catégories se différencient par la section du conducteur, le volume de matières combustibles apportées par l'échantillon et la durée d'exposition aux flammes.

a) Appareillage et source d'énergie

L'appareillage est défini par le standard EIC 30332-3-10 [45].

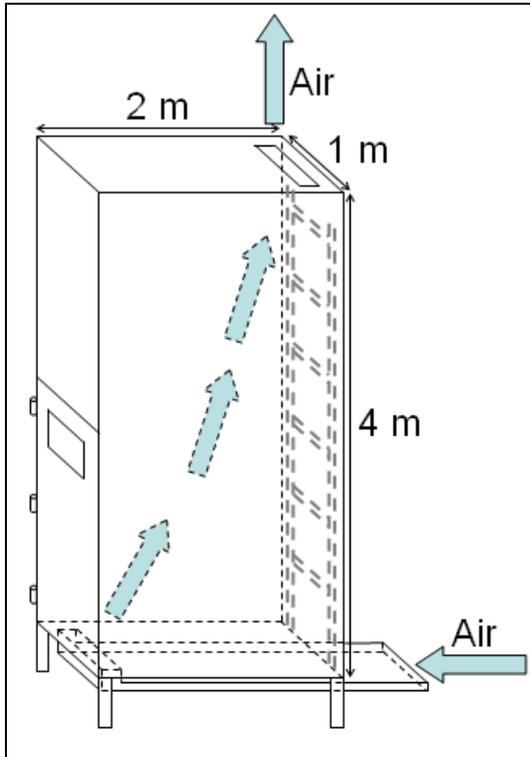


Figure 4.17 : Cabine d'essai [45]

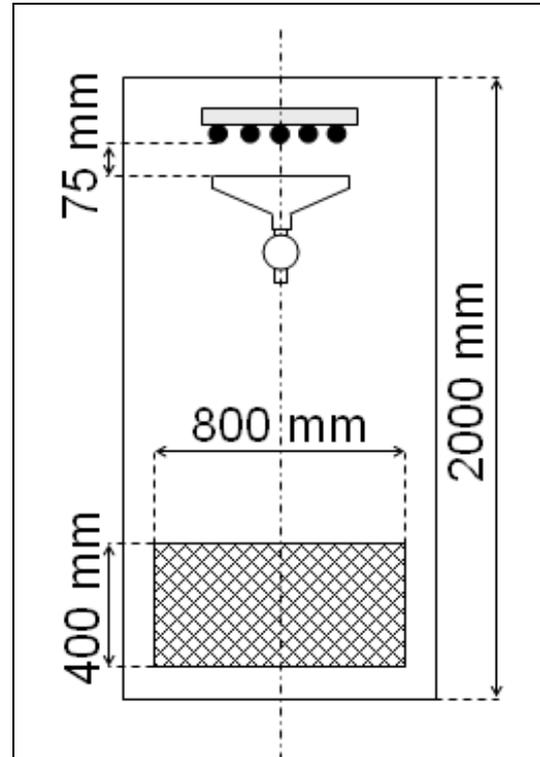


Figure 4.18 : Cabine vue du dessus [45]

Les essais sont réalisés dans la cabine illustrée en figure 4.17. Un courant d'air circule du bas vers le haut de la cabine, son débit est de $(5\,000 \pm 500)$ litre/min à 20°C. Deux échelles de largeurs différentes sont utilisées en fonction de la catégorie : l'échelle standard de 500 mm et l'échelle de 800 mm de large. La source de chaleur est fournie par un ou deux brûleurs de type ruban. Comme le montre la figure 4.18, la distance entre la face du brûleur et la surface de l'échantillon est d'environ 75 mm. Le brûleur se trouve à une distance de 600 mm du sol.

Le gaz de combustion est un mélange d'air et de propane dont la pureté est supérieure à 95%. Le standard [45] définit les débits d'air et de propane dans les conditions du standard (1 bar et 20 °C) :

- Air : $(77,7 \pm 4,8)$ l.min⁻¹ soit (1550 ± 140) mg.s⁻¹
- Propane : $(13,5 \pm 0,5)$ l.min⁻¹ soit (442 ± 10) mg.s⁻¹

Avec un pouvoir calorifique de 46,4 kJ.g⁻¹ pour le propane, la puissance nominale fournie est de $(73,7 \pm 1,68) \times 10^6$ J.h⁻¹ [45].

b) Catégories de l'essai et résultat conforme

Le standard IEC 60332-3 définit 5 catégories de câbles :

- Catégories A F/R IEC 60332-3-21 [46]
- Catégories A IEC 60332-3-22 [47]
- Catégories B IEC 60332-3-23 [48]
- Catégories C IEC 60332-3-24 [49]
- Catégories D IEC 60332-3-25 [50]

Suivant les catégories d'essais, l'échantillon, le type d'échelle, le positionnement des câbles et la durée d'application de la flamme varient.

L'échantillon est composé de câbles de 3,50 mètres de long attachés sur l'échelle. Le nombre de tronçons de câbles doit satisfaire un volume de matière combustible par mètre sur l'échelle. La durée de l'application de la flamme est de 20 ou 40 minutes suivant le standard. La disposition des câbles se fait sur la face avant de l'échelle pour les catégories A, B, C et D. Pour la catégorie A F/R, les câbles sont disposés sur les faces avant et arrière. Lorsqu'un câble possède au moins un conducteur avec une section d'âme supérieure à 35 mm² les câbles sont espacés, sinon les câbles sont joints. Les conditions des essais sont résumées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Définition des conditions d'essais suivant les catégories de câbles [46 ; 47 ; 48 ; 49 ; 50]

	Catégories							
	A F/R	A		B		C		D
Volume de combustible	7 (l/m)	7 (l/m)		3,5 (l/m)		1,5 (l/m)		0,5 (l/m)
Durée de la flamme	40 minutes	40 minutes		40 minutes		20 minutes		20 minutes
Disposition sur les faces de l'échelle	Avant et arrière	Avant		Avant		Avant		Avant
Section du conducteur	>35 mm ²	>35 mm ²	<35 mm ²	>35 mm ²	<35 mm ²	>35 mm ²	<35 mm ²	<35 mm ²
Echelle (largeur)	500 mm	800 mm	500 mm	500 mm		500 mm		500 mm
Nombre de couches	1	1	Plusieurs	1	Plusieurs	1	Plusieurs	Plusieurs
Câbles	Espacés	Espacés	Joints	Espacés	Joints	Espacés	Joints	Joints

Après avoir réalisé les essais suivant les standards, et éteint la flamme du brûleur, l'échantillon doit s'éteindre naturellement. Si il continue de brûler au-delà de 60 minutes après le début de l'essai, il faut l'éteindre manuellement (extincteur, aspersion d'eau...).

Pour être conforme au standard suivant lequel le câble est testé, la longueur de **la partie brûlée de l'échantillon doit être inférieure à 2,5 mètres.**

c) Installation et besoins



Figure 4.19 : Cabine d'essai de propagation d'incendie et débitmètres

La cabine est de forme rectangulaire comme le montre la figure 4.19. Elle est placée dans le laboratoire comme cela est indiqué sur la figure 4.1. Pour réaliser l'essai, l'installation est reliée aux sources de propane et d'air comprimé. Les débits de gaz sont contrôlés par une armoire à débitmètres visible à droite sur la figure 4.19. Les débits des gaz des deux brûleurs sont régulés séparément. Les affichages numériques donnent des débits en mg.s^{-1} .

L'installation de la cabine est réalisée depuis le mois de mai 2009, mais aucun essai n'avait encore été réalisé. Tous les raccordements électriques et de conduites de gaz sont corrects, mais les débitmètres n'ouvrent pas les vannes des canalisations de gaz. Le problème est une fois de plus très dissimulé... Avec l'aide de l'équipe de maintenance qui a aidé à l'installation en mai 2009, nous cherchons pourquoi les débits de gaz restent nuls. En cherchant dans des tiroirs, je trouve un câble de liaison qui ressemble à ceux qui relient l'armoire à débitmètres aux canalisations. Lorsque ce câble est branché les débits s'actionnent tout de suite. On comprendra que ce câble sert à shunter une sécurité qui n'est pas utilisée sur notre installation (la sécurité n'est pas présente). Après quelques essais où les câbles ont entièrement brûlé, les débits de gaz redeviennent nuls. Cette fois, nous savons que le problème ne vient pas d'un câble manquant. Nous remarquons qu'une sécurité s'enclenche lorsque la température est trop importante, il suffit donc de réarmer cette sécurité pour que les débits augmentent.

Le listing des besoins montre que les câbles de liaison, qui se trouvent à l'intérieur de la cabine durant l'essai, sont rapidement détériorés à cause des températures élevées. Ces câbles de liaisons doivent être remplacés après chaque essai, c'est surtout le cas pour les câbles des thermocouples. Comme pour l'essai de propagation de flamme, cet essai consomme du propane et de l'air comprimé.

II.5) **Essai de détermination de la quantité de gaz acide halogéné dans les fumées de combustion : IEC 754-1 [51]**

Cet essai est réalisé sur un échantillon prélevé sur une composante du câble (gaine, bourrage, isolant...). L'échantillon est brûlé dans un four, les gaz émis sont récupérés puis titrés, pour définir la quantité d'acide chlorhydrique émise par gramme d'échantillon. Cette méthode s'applique pour des échantillons qui émettent plus de 5 mg d'acide chlorhydrique par gramme d'échantillon.

a) Appareillage d'essais et conditions opératoires

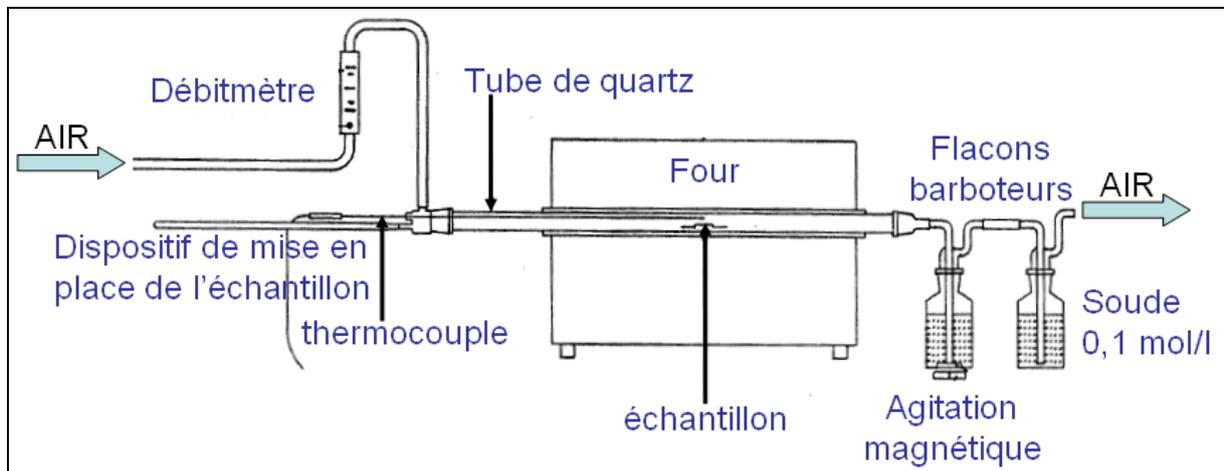


Figure 4.20 : Appareillage d'essai pour la mesure de la quantité d'HCl dans les fumées de combustion [51]

La figure 4.20 montre l'appareillage à utiliser pour réaliser l'essai IEC 754-1. Un tube de quartz contient une masse m d'environ 1000 mg d'échantillon pesée précisément. Ce tube est placé dans un four et un thermocouple mesure la température à proximité de l'échantillon. Un courant d'air circule dans le tube pour entraîner les fumées vers des flacons barboteurs. L'air utilisé doit avoir une vitesse de $20 \text{ ml.mm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ avec une tolérance de 10%, le débit d'air est fonction du diamètre intérieur du tube. La relation numérique qui donne le débit en fonction de la vitesse et du diamètre est :

$$Q_v = 0,0155 \times D^2$$

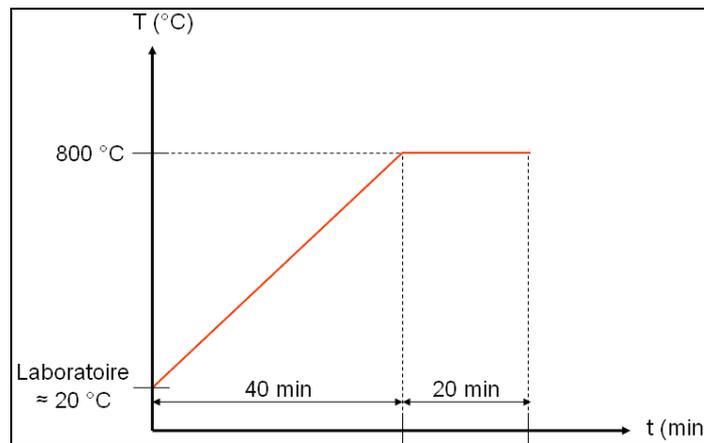
Avec

Q_v le débit d'air en l.h^{-1}

D le diamètre intérieur du tube en mm

Le dispositif de barbotage est constitué de deux flacons contenant de la soude à $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$. Le volume de soude doit permettre une immersion de la tige de barbotage d'environ 10 cm. Le premier flacon est équipé d'une agitation magnétique.

Le four tubulaire a une longueur efficace de 500 à 600 mm. La valeur de son diamètre est entre 40 et 60 mm. Le four est chauffé et régulé électriquement.



Graphique 4.2 : Cycle de chauffage conforme au standard IEC 754-1

Le graphique 4.2 illustre le cycle de chauffage subi par l'échantillon. La température s'élève dans un premier temps depuis environ 20 °C jusqu'à 800 °C en 40 minutes (soit 20 °C par minute). Une fois à 800 °C, le four maintient sa température pendant 20 minutes.

b) Dosage des ions chlorures et détermination de la quantité d'acide halogéné

Durant l'essai, les gaz émis par la combustion barbotent dans la solution de soude. Il se produit un phénomène d'absorption chimique entre les fumées acides et la soude. Les ions chlorures se trouvent alors en solution. Les deux flacons barboteurs sont transvasés dans une fiole de 1 litre, et le volume est complété avec de l'eau distillé.

(i) Dosage des ions chlorures : Méthode de Carpentier - Volhard

Les ions chlorures sont dosés suivant la méthode de Carpentier - Volhard. La méthode consiste à introduire un excès de nitrate d'argent dans la solution à titrer. Une partie des ions argent réagit avec le chlorure et l'autre partie sera titrée par du thiocyanate d'ammonium. La quantité totale d'ion argent ajoutée étant connue et la quantité en excès étant titrée, la quantité qui a réagi avec le chlorure est calculée.

Le titrage est réalisé sur un échantillon de 200 ml.

Les équations chimiques sont les suivantes :



Les équations parasites 4.1 et 4.2 montrent la réaction des ions argents avec les ions hydroxyde et carbonate. Avant d'ajouter le nitrate d'argent à 0,1 mol.l⁻¹, le pH de la solution doit donc être baissé pour éviter les réactions 4.1 et 4.2, pour cela 4 ml d'acide nitrique concentré sont ajoutés. Une fois le pH réduit, 20 ml de nitrate d'argent sont ajoutés à la solution, la réaction 4.3 se produit. Il se forme alors un précipité blanc qui noirci à la lumière : ce sont les cristaux de chlorures d'argent. Pour éviter la détérioration du chlorure d'argent suivant la réaction 4.4, 3 ml de nitrobenzène sont ajoutés. Pour détecter l'équivalence lors du dosage, un indicateur coloré est utilisé : 1 ml de sulfate ferrique d'ammonium à 40% (FeNH₄(SO₄)₂).

Le dosage est réalisé suivant l'équation 4.5 par une solution de thiocyanate d'ammonium à 0,1 mol.l⁻¹. A l'équivalence, la réaction suivante se produit :



Le produit du thiocyanate et de l'ion ferrique suivant la réaction 4.6 donne une coloration rouge. Cette coloration permet de détecter l'équivalence et le volume équivalent $V_{\text{éq}}$.

(ii) Détermination de la quantité d'acide halogéné

La quantité totale d'ion argent intervient dans les équations 4.3 et 4.5. D'après ces équations, la quantité totale d'argent est égale à la quantité de chlorure présent dans l'échantillon titré et à la quantité d'ions thiocyanate versée pour obtenir l'équivalence :

$$n_{\text{total}}(Ag^{+}) = n(Cl^{-}) + n(SCN^{-})$$

Cette quantité totale d'argent est déterminée par la titration d'un essai blanc (sans échantillon plastique). Soit $V_{\text{éq1}}$ le volume équivalent pour doser la solution d'argent et $V_{\text{éq2}}$ le volume équivalent lors du dosage des ions chlorure.

$$\begin{aligned} n(Cl^{-}) &= n_{\text{total}}(Ag^{+}) - n(SCN^{-}) \\ n(Cl^{-}) &= V_{\text{éq1}} \times [SCN^{-}] - V_{\text{éq2}} \times [SCN^{-}] \\ n(Cl^{-}) &= (V_{\text{éq1}} - V_{\text{éq2}}) \times [SCN^{-}] \end{aligned}$$

La quantité d'acide est égale à la quantité d'ions chlorure (en mole). Le dosage est réalisé sur 200 ml d'une solution totale de 1000 ml. Le chlorure total est cinq fois plus important.

$$\begin{aligned} n(HCl)_{\text{total}} &= 5 \times n(Cl^{-}) \\ n(HCl) &= 5 \times (V_{\text{éq1}} - V_{\text{éq2}}) \times [SCN^{-}] \\ m(HCl) &= n(HCl) \times M(HCl) \\ m(HCl) &= 5 \times (V_{\text{éq1}} - V_{\text{éq2}}) \times [SCN^{-}] \times M(HCl) \end{aligned}$$

La quantité d'acide halogéné exprimé en milligrammes d'acide chlorhydrique par gramme d'échantillon prélevé est :

$$m(HCl) = \frac{5 \times (V_{\text{éq1}} - V_{\text{éq2}}) \times [SCN^{-}] \times M(HCl)}{m}$$

Avec

$m(HCl)$ en mg par gramme d'échantillon,

$M(HCl)$ 36,5 g.mol⁻¹

$V_{\text{éq1}}$ et $V_{\text{éq2}}$ en ml

m masse de l'échantillon en g.

c) Installation, réglage et besoin

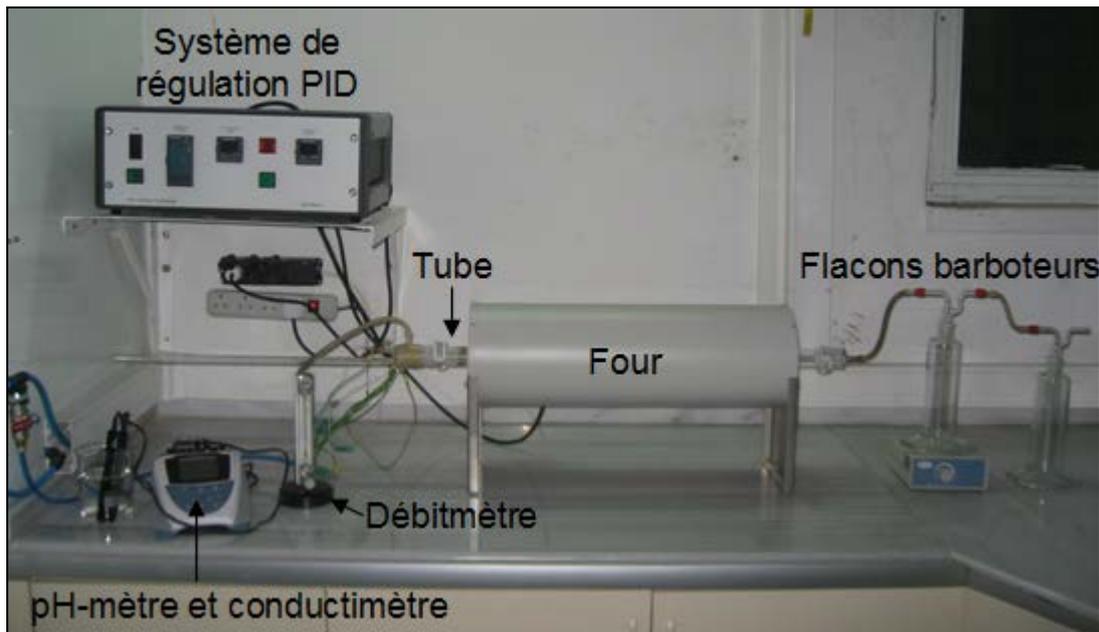


Figure 4.21 : Installation pour les essais de mesure de pourcentage d'HCl, pH et conductivité

L'installation illustrée, en figure 4.21, est placée dans le laboratoire sur la partie courte de la paillasse en marbre en figure 4.1. Une étagère en métal est fabriquée et fixée sur le mur pour supporter le système de régulation PID. Pour réaliser l'essai, le four est alimenté par un courant électrique régulé. La régulation se fait par un contrôleur PID. Il faut dans un premier temps, définir les paramètres PID du régulateur. Une fonction du régulateur permet une auto détermination des paramètres PID, pour cela il génère automatiquement un boucle de régulation lors de sa première mise en chauffe. Pour que ce calcul de paramètres PID soit précis, il faut qu'il s'effectue pour une température proche de la température de travail, c'est-à-dire 800°C. De plus il faut bien placer le thermocouple qui gère la régulation. Le système de régulation de chauffage permet de créer des programmes de chauffage comme l'exige le standard sur le graphique 4.2.

Pour réaliser l'essai il faut qu'une source d'air soit placée à proximité de l'installation. Un débit d'air doit circuler à travers le four tubulaire durant l'essai. Le débit d'air doit avoir une vitesse de 20 ml.mm⁻².h⁻¹ avec une tolérance de 10%. Pour calculer le débit correspondant il faut mesurer le diamètre interne du tube, ce qui n'est pas possible de façon assez précise. La mesure du diamètre extérieure est 38 mm, le débit est calculé sur la base d'une supposition de l'épaisseur « e » de la paroi du tube. On suppose que 1 mm < e < 2,5 mm et on calcule les débits : $Q_v = 0,0157 \times D^2 \text{ l.h}^{-1}$

- Pour e = 1 mm, D = 36 mm et $Q_v = 20 \text{ l.h}^{-1}$
- Pour e = 2,5 mm, D = 33 mm et $Q_v = 17 \text{ l.h}^{-1}$

Comme le standard donne 10% de tolérance, si on opère avec $Q_v = 18,5 \text{ l.h}^{-1}$ la vitesse est dans la fourchette de l'incertitude tolérée.

Pour le dosage des ions chlorures, des solutions de soude, de nitrate d'argent, de thiocyanate de potassium, de nitrobenzène, d'acide nitrique concentré et de sulfate ferrique d'ammonium sont utilisées. Les solutions de soude, de nitrate d'argent, de thiocyanate et de sulfate ferrique sont préparées à partir de solide dilué dans l'eau distillée. Pour préparer les solutions de la verrerie adaptée et une balance de précision sont

utiles. Le nitrobenzène et l'acide nitrique concentré sont conditionnés dans des flacons de 2 litres.

II.6) Essai de détermination de la corrosivité des fumées de combustion par mesure de pH et de conductivité : IEC 60754-2 [52]

Cet essai est réalisé sur un échantillon prélevé sur une composante du câble (gaine, bourrage, isolant...). L'échantillon est brûlé dans un four et les gaz émis barbotent dans de l'eau distillée. En fin d'essai, le pH et la conductivité de la solution de barbotage sont mesurés. Cette méthode s'applique pour des échantillons qui émettent moins de 5 mg d'acide halogéné par gramme d'échantillon.

a) Appareillage d'essai et conditions opératoires

L'appareillage est identique à celui du standard IEC 60754-1, il est présent en figure 5.21. Le débit d'air est inchangé. Le barbotage peut être réalisé dans un seul flacon. La masse d'échantillon doit être égale à (1000 ± 5) mg. L'eau distillée doit avoir un pH compris entre 5 et 7, et sa conductivité doit être inférieure à $1 \mu\text{S}/\text{mm}$. Le volume d'eau distillée est de (1000 ± 10) ml.

La combustion est réalisée à 935°C pendant 30 minutes.

Les mesures du pH et de la conductivité sont réalisées sur chaque essai.

b) Résultats et conformité

Pour chaque composant i du câble (isolant, rembourrage, gaine...), l'essai IEC 754-2 est réalisé. A partir des valeurs de pH et de conductivité des composants i , le pH pondéré et la conductivité pondérée sont calculés pour un gramme de câble :

$$pH' = \log_{10} \left[\frac{\sum_i m_i}{\sum_i \left(\frac{m_i}{10^{pH_i}} \right)} \right]$$

Avec

pH' le pH pondéré pour un gramme des matériaux combustibles du câble

m_i la masse du composé i sur un même tronçon de câble

pH_i le pH pour le composé i

$$C' = \frac{\sum_i C_i \times m_i}{\sum_i m_i}$$

Avec

C' la conductivité pondérée pour un gramme des matériaux combustibles du câble

m_i la masse du composé i sur un même tronçon de câble

C_i la conductivité pour le composé i

Pour être conforme au standard IEC 60754-2 les valeurs de pH et de conductivité doivent être les suivantes :

- $pH' > 4,3$
- $C' < 10 \mu\text{S}.\text{mm}^{-1}$.

c) Besoins

La masse de l'échantillon doit être pesée sur une balance de précision. Pour la mesure du pH et de la conductivité, des solutions tampons permettent l'étalonnage des sondes de mesure.

II.7) Détermination de l'indice d'oxygène (Oxygene Index) ISO 4589

a) Appareillage d'essai

Le principe de l'essai consiste à déterminer la concentration d'oxygène dans un mélange oxygène-azote afin de maintenir la combustion d'un matériau pendant une durée donnée ou sur une longueur donnée. L'origine de cet essai est une étude de la NASA suite à l'incendie de la capsule Apollo qui avait coûté la vie à trois astronautes [53]. Les articles des standards ISO 4589-1 [54], ISO 4589-2 [55] et ISO 4589-3 [56] décrivent les méthodes pour réaliser les essais suivant le type du matériau et la température d'essais :

- ISO 4589-1 : Guide
- ISO 4589-2 : Essai à température ambiante
- ISO 4589-3 : Essai à température élevée

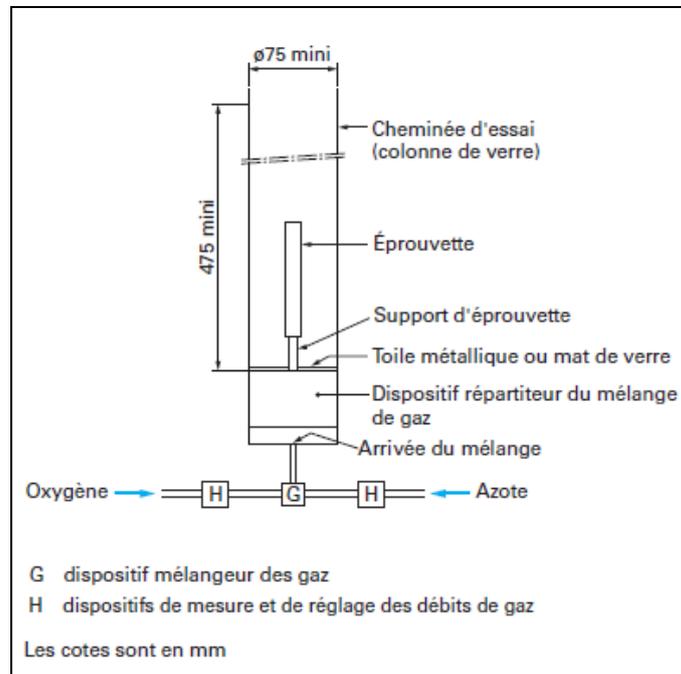


Figure 4.22 : Dispositif pour la mesure de l'indice d'oxygène [53]

La figure 4.22 illustre le dispositif général pour mesurer l'indice d'oxygène. L'échantillon est la matière première moulée conformément aux dimensions standards. Il est placé verticalement dans une cheminée en verre. L'échantillon est enflammé en son sommet par un dispositif standard (flamme de type diffusion). La concentration d'oxygène est déterminée par les débits d'oxygène et d'azote qui circulent de la base de la cheminée vers le haut. **L'indice d'oxygène IO est le pourcentage d'oxygène qui permet à l'échantillon de brûler durant 3 minutes ou sur 5 cm [52].**

$$IO = \frac{100 \times Q_{vO_2}}{Q_{vN_2} + Q_{vO_2}}$$

Avec

Q_v Le débit volumique

L'indice d'oxygène à 23 °C du PP et du PE est de 17%. Grâce au chlore qui diminue son inflammabilité, l'indice d'oxygène du PVC est de 45%.

b) Installation

L'appareil utilisé pour l'essai est installé sous la hotte, à côté de la cabine pour l'essai de propagation de flamme. Il est visible en figure 4.9. Pour cet essai, l'appareil doit être relié aux bouteilles d'azote et d'oxygène situé à l'extérieur du laboratoire.

Pour pouvoir réaliser les mesures d'I.O., une presse à injection est nécessaire pour réaliser les échantillons à partir des matières premières en granulés. Le laboratoire n'est pas équipé de ce matériel. Ces mesures d'I.O. commenceront seulement après l'acquisition de cette presse.

Hormis les gaz, cet essai ne présente pas de réels consommables.

II.8) Conclusion

Le nouveau laboratoire est composé d'installations qui peuvent avoir des volumes très importants, c'est le cas pour l'essai de densité de fumées et l'essai de propagation d'incendie. L'organisation des emplacements, des différents appareils d'essai, est réalisé afin d'offrir un environnement de travail agréable et pratique d'utilisation.

En fonction des emplacements des machines, leurs raccordements aux fluides gazeux sont réalisés. Pour ce raccordement, les aspects pratiques et sécuritaires sont pris en compte. Pour ne pas engendrer des risques, les tuyaux qui acheminent les gaz suivent des voies clairement définies. Ces voies sont placées à l'écart des sources de chaleurs.

Une fois raccordés aux conduites de gaz et alimenté en électricité, les appareils sont testés pour voir valider leur fonctionnement. Durant cette étape, les différents problèmes répertoriés sont notés, ainsi que les solutions trouvées. La création de manuels d'installation plus adaptés est apparue comme une nécessité. Pour chaque appareil, une réflexion sur son manuel d'installation est entamée.

Une fois que les appareils fonctionnent, il faut dans certains cas les calibrer. C'est particulièrement le cas pour l'essai de densité de fumées. Les réglages sont réalisés jusqu'à obtenir les valeurs exigées par les standards.

Suite au listing des différents consommables de chaque installation, il faut trouver un fournisseur de matériels de laboratoire. Ce fournisseur doit être capable de livrer rapidement avec un bon rapport qualité/prix de ses produits. Le choix d'un fournisseur de produits chimiques, d'eau distillée et de verrerie se tourne vers une société basée à Istanbul. Cette société offre des tarifs compétitifs et des délais de livraison très courts.

III. Zones de stockage

III.1) Stockage des bouteilles de gaz

Comme nous l'avons vu, les essais consomment de l'air comprimé, du propane, de l'oxygène et de l'azote. L'air comprimé est fourni par le site, une canalisation mère achemine l'air à l'intérieur du laboratoire. Les autres gaz sont conditionnés dans des bouteilles. Pour des raisons de sécurité, la décision de stocker les bouteilles à l'extérieur du laboratoire a été prise dès l'aménagement des locaux.

III.2) Stockage des solvants et produits chimiques

La zone de stockage présentée en figure 4.2 est spacieuse et est essentiellement utilisée pour les produits chimiques et les solvants. Le listing des produits organiques est le suivant :

- Ethanol en grande quantité (100 L)
- Méthanol en quantité moyenne (10 L)
- Toluène en quantité moyenne (10 litres)
- Trichloroéthylène en quantité moyenne (10 L)
- Nitrobenzène en faible quantité (2 L)

Les autres produits sont :

- L'acide nitrique concentré en faible quantité (2 L)
- Le nitrate d'argent en poudre (250 g)
- Le thiocyanate d'ammonium en poudre (500 g)
- Le sulfate ferrique d'ammonium en poudre (500 g)
- La soude en pastille (500 g)
- Etalons de pH 4,1 ; 7 et 10,1
- Etalons de conductivité 1413 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 12,9 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Deux armoires avec aspiration se trouvent dans la zone de stockage et des étagères se trouvent sur les murs.

Le listing montre que toutes sortes de produits chimiques se trouvent dans cette zone de stockage : des combustibles, des comburants, des corrosifs... Le stockage des éléments ne doit pas se faire de façon anarchique et les produits sont classés par même type d'espèce et par même volume. Les alcools, le toluène et le trichloroéthylène sont rangés sur les étagères. Des bacs de rétention sont prévus sous les étagères en cas de fuites. L'acide nitrique concentré crée des mélanges explosifs avec les matières organiques, l'acide est placé dans une armoire ventilée avec les étalons de pH et les étalons de conductivités. La soude est dans l'armoire différente de celle où se trouve l'acide. Le nitrobenzène est placé dans l'armoire où se trouve la soude. Les poudres (moins réactives) sont placées dans les armoires de la manière suivante :

- Nitrate d'argent dans l'armoire avec l'acide nitrique
- Le sulfate ferrique dans l'armoire avec l'acide nitrique
- Le thiocyanate avec la soude

Ces séparations sont faites afin que les produits se retrouvent aux cotés de produits avec lesquels ils sont le moins réactifs.

Pour éviter la formation d'atmosphère réactive ou explosive, les armoires sont aspirées continuellement et les vapeurs sont rejetées à l'extérieur du laboratoire. Pour les

mêmes raisons, l'ensemble de la zone de stockage est aspiré et les vapeurs rejetées vers l'extérieur.

IV. Analyse des risques

Le laboratoire d'essai incendie utilise différents produits inflammables gazeux et liquides. Dans ce laboratoire, où les incendies sont provoqués intentionnellement, la maîtrise des risques de propagation, ou d'embrassement non-désirés, doit être maximum. Cette partie s'intéressera à l'étude des risques au sein du laboratoire et en particuliers aux risques d'incendie.

IV.1) Atmosphère explosive : réglementation ATEX

La Communauté Européenne met en place en 2003 une réglementation ATEX (ATmosphère EXplosive). Les articles [57] et [58] décrivent la réglementation ATEX ainsi que les appareils et systèmes de protection.

Cette réglementation demande aux dirigeants d'entreprises de promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs. Pour cela ils doivent définir les emplacements où des ATEX peuvent se former, signaler leurs présences, délimiter leurs zones, s'équiper d'appareils et lutter contre leurs formations.

Cette réglementation propose une méthode d'analyse et une délimitation en zones, permettant de définir les risques dans notre espace de travail.

a) Délimitation des zones ATEX

La norme ATEX définit 3 zones suivant la probabilité de formation d'atmosphères explosives. Ces zones sont numérotées 0 ; 1 et 2 pour les gaz, vapeurs et brouillards inflammables. Elles sont numérotées 20 ; 21 et 22 pour les poussières.

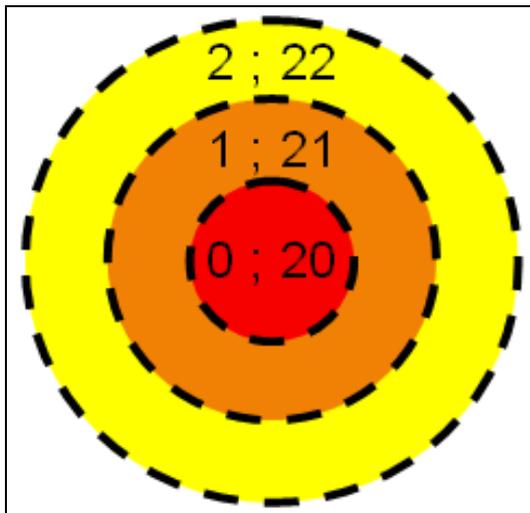


Figure 4.23 : Zones ATEX

Le laboratoire ne se trouve pas réellement en zone 0. Il n'y a pas d'accumulation de gaz ou de vapeur de façon permanente. Malgré des installations qui possèdent des protections qui stoppent les débits de gaz, des ATEX sont susceptibles de se former. En effet, si une fuite de gaz se crée lors de l'acheminement, l'ensemble du laboratoire est délimité en zone 1. Même effet pour le stockage de solvant, en temps normal les fûts sont

La figure 4.23 illustre les zones ATEX :

- **Zone 0 et 20** : ATEX présente en permanence, fréquente ou pendant de longues périodes.
- **Zone 1 et 21** : Emplacement où une ATEX est susceptible de se former en fonctionnement normal.
- **Zone 2 et 22** : Emplacement où une ATEX ne peut pas se former, ou, si elle se présente, elle n'est que de courte durée.

fermés et la ventilation est continue, mais si un fût est percé et/ou la ventilation devient défectueuse il peut y avoir création d'une ATEX.

b) Appareils et systèmes de protection

Pour lutter contre la formation des ATEX, le laboratoire doit être équipé de détecteur de propane à proximité des jointures des canalisations et des installations utilisant le propane. Même approche dans la zone de stockage, des capteurs doivent être utilisés. Ces derniers doivent être capables de mesurer le taux d'éthanol, de méthanol et de toluène et/ou l'explosivité du mélange avec l'air.

IV.2) Propagation d'incendie dans le laboratoire

Les installations sont destinées à brûler des câbles et des matériaux plastiques. En cas de fonctionnement anormal ou d'erreur de manipulations, la combustion peut être amenée à s'étendre au delà de l'installation d'essai. Pour éviter la propagation des flammes, des extincteurs sont placés de façon stratégique à proximité des installations à risques.

IV.3) Risques chimiques

a) Risques liés aux solvants

Les solvants sont tous des éléments offensifs pour l'homme, seul leur degré de toxicité varie. La manipulation des solvants doit être réalisée avec des équipements de protection individuelle (EPI : lunettes, gants, blouse...). Le toluène présente une toxicité pour la reproduction, mais il est inclassable pour sa faculté ou non à provoquer un cancer. Le méthanol est un toxique mortel par inhalation et peut rendre aveugle. Le trichloréthylène et le nitrobenzène sont des produits probablement cancérigènes, ils sont toxiques pouvant entraîner la mort. En plus des EPI, la manipulation des solvants doit être réalisée sous hotte pour éviter l'inhalation des vapeurs.

b) Risques liés aux acides, bases et produit minéraux

L'emploi d'acide nitrique concentré est dangereux pour l'opérateur. La manipulation doit être méticuleuse et sous protection individuelle (gants, lunettes et blouse), de graves brûlures peuvent avoir lieu en cas de contact avec la peau et les yeux, son inhalation et son injection peuvent être mortelles. La soude est un irritant pour la peau et les yeux. Le nitrate d'argent est un oxydant puissant et un comburant, il provoque des brûlures avec la peau et peut être mortel par injection. Comme pour les solvants, la manipulation de ces produits implique le port des EPI. Des solutions de diphotérine doivent être placées pour le rinçage des yeux en cas de projections.

V. Répétabilité et reproductibilités des mesures

Après avoir équipé le laboratoire et fini d'installer les machines, certains essais nécessitent de faire des tests de répétabilité et de reproductibilité. Ces tests permettront de quantifier l'incertitude de la mesure et la capacité à reproduire un même essai le même jour et dans le temps.

V.1) Densité de fumées IEC-60134

a) Essais de répétabilité et reproductibilité sur une solution de toluène

Pour quantifier l'incertitude de la mesure sans l'impact du câble, une série de mesures est réalisée sur une solution de toluène à 10%. La mesure de la transmission de lumière minimum permet le calcul de la surface d'extinction.

$$Ac = \frac{\log \frac{I_0}{I}}{\% \text{toluène}} \times \frac{\text{volume de la cabine (m}^3\text{)}}{\text{longueur du trajet optique (m)}}$$

Avec,

Ac la surface d'extinction calculée en m^2

I_0 l'intensité du flux lumineux émis par la source $J.s^{-1}.m^{-2}$

I l'intensité du flux lumineux transmis à travers la fumée $J.s^{-1}.m^{-2}$

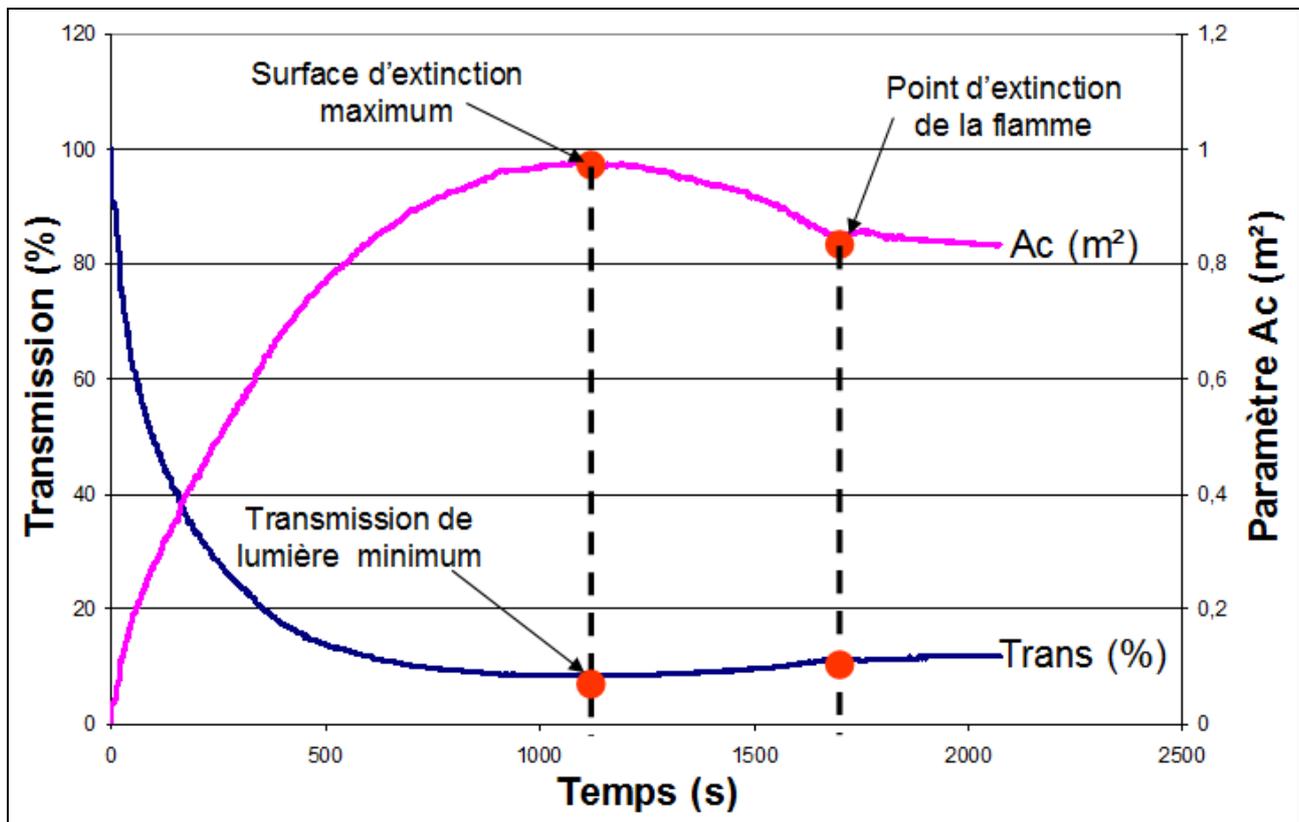


Figure 4.24 : Graphique pour les mesures des essais de répétabilité sur le toluène à 10%

La figure 4.24 illustre les points utilisés pour les essais de répétabilité avec le toluène à 10%. Pour ces essais, on relève la mesure de la transmission minimum de lumière, la mesure de la surface d'extinction maximum, le temps pour obtenir ces deux

valeurs, ainsi que la durée de la combustion. Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 4.4.

Essais	Surface d'extinction (m ²)	Transmission de lumière (%)	temps (s)	Durée de combustion (s)
1	0,893815	10,15951	1067	1644
2	0,878826	10,55666	989	1638
3	0,893155	10,17666	1093	1650
4	0,901524	9,9611	1018	1638
5	0,881512	10,48436	1011	1652
6	0,897919	10,05338	1012	1638
7	0,906795	9,82767	1054	1622
8	0,91132	9,71454	1002	1618
Moyenne	0,90	10,12	1031	1638
Ecart type	0,01	0,29	36	12
Minimum	0,878826	9,71454	989	1618
Maximum	0,91132	10,55666	1093	1652

Le tableau 4.4 récapitule les mesures réalisées sur 8 échantillons de 1 litre de solution de toluène à 10%. Pour minimiser les sources d'incertitudes, les solutions sont prélevées à partir d'une solution mère réalisée un jour avant l'essai. Tous les essais sont réalisés par le même opérateur et de façon identique.

Sur cette série de 8 essais, les mesures de transmissions minimum de lumière ainsi que les durées pour les atteindre sont toutes très proches. Les valeurs des moyennes et d'écart types montrent des dispersions faibles entre les mesures. La moyenne de la surface d'extinction est de 0,90 m² et son écart type est de 0,01 m². Ces valeurs correspondent à une transmission de lumière moyenne de 10,12% avec un écart type de 0,29%. D'après ces résultats, en supposant que le nombre des valeurs mesurées soit suffisant et que les mesures suivent une loi normale, l'incertitude de la mesure peut être définie comme égale à 2 ou 3 fois l'écart type. Soit pour des valeurs d'incertitude égales à 2 fois l'écart type (97,7% des mesures sont comprises dans cet intervalle) :

- **S = (0,90 ± 0,02) m²**
- **Tr = (10,1 ± 0,6) %**

La mesure de la densité de fumées d'une solution de toluène à 10% offre de bons résultats de répétabilité. Ces résultats permettent de définir l'incertitude de la mesure du capteur autour de 0,6% de transmission de lumière.

Essais	Surface d'extinction (m ²)	Transmission de lumière (%)	temps (s)	Durée de combustion (s)
Moyenne	0,90	10,12	1031	1638
Reproductibilité	0,90	10,11	1032	1638

Le tableau 4.5 illustre l'essai de reproductibilité réalisé sur **la même solution** de toluène à 10% (issue de la solution mère), dans les mêmes conditions, **mais à une date différente (environ 3 semaines plus tard)**. Pour cet essai, **les valeurs sont identiques** à la moyenne des essais de répétabilité. La mesure de la densité de fumées sur la combustion du toluène à 10% est donc un essai répétable et reproductible. Cet essai est utilisé pour tester la conformité de l'installation vis-à-vis du standard, il est appelé essai de

qualification (II.2) d) de ce chapitre). La répétabilité de l'essai et surtout sa reproductibilité permettent l'essai de qualification à différentes périodes de l'année.

b) Essais de répétabilité et reproductibilité sur un câble de gros diamètre

Les essais de répétabilité sont réalisés sur un câble de gros diamètre (45 mm). Pour chaque essai, l'échantillon est un tronçon de câble de 1 mètre issu de la même ligne de production. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 4.6.

$$A_c = \frac{\log \frac{I_0}{I}}{n} \times \frac{\text{volume de la cabine (m}^3\text{)}}{\text{longueur du trajet optique (m)}}$$

Avec,

A_c la surface d'extinction calculée en m^2 par mètre de câble

I_0 l'intensité du flux lumineux émis par la source $J.s^{-1}.m^{-2}$

I l'intensité du flux lumineux transmis à travers la fumée $J.s^{-1}.m^{-2}$

n nombre de tronçons de câble de 1 mètre

Tableau 4.6 : Essais de répétabilité de la densité de fumées sur câble			
Essais	Surface d'extinction (m^2)	Transmission de lumière (%)	temps (s)
1	4,829	29,067	2385
2	4,635	30,548	2392
3	4,641	30,495	2395
4	4,498	31,635	2390
5	4,809	29,221	2396
6	4,604	30,788	2401
7	4,238	33,818	2395
Moyenne	4,61	30,80	2393
Ecart type	0,20	1,60	5
Minimum	4,238	29,067	2385
Maximum	4,829	33,818	2401

Les résultats des essais réalisés sur un câble montrent une dispersion des valeurs plus élevées que pour les essais avec le toluène à 10%. En effet, avec les mêmes suppositions et des valeurs d'incertitude égales à 2 fois l'écart type, les valeurs de surface d'extinction maximum et de transmission de lumière minimum sont :

- **S = (4,6 ± 0,4) m²**
- **Tr = (31 ± 3) %**

La répétabilité de l'essai sur ce type de câble est faible. L'incertitude de la mesure de la transmission de lumières minimum est autour de 3%, soit 6 fois plus que pour l'essai avec le toluène. L'introduction d'un câble amène une source d'incertitude supplémentaire, d'où cette augmentation de l'écart type. En effet, la combustion d'un solide est plus complexe que celle d'un liquide. Le chapitre 4, réservé aux phénomènes de combustion montre la complexité de la combustion de molécules très simples telles que l'éthylène. Un polymère est une macromolécule avec des formulations très variées, la complexité et la diversité des phénomènes intervenant lors de sa combustion est davantage complexe. En passant d'une solution de toluène à 10% à un câble gainé, on passe de la combustion d'une solution bi-moléculaire à celle d'un solide constitué de plusieurs dizaine d'éléments (polymère, charges, adjuvants, colorants...). Une hypothèse qui peut expliquer

l'augmentation de l'incertitude, entre la solution de toluène et le câble, est que l'incertitude liée à la combustion d'un solide est supérieure à celle d'un liquide. Nous pouvons aussi supposer que chaque élément qui compose le câble apporte une incertitude supplémentaire lors de la combustion.

Essais	Surface d'extinction (m ²)	Transmission de lumière (%)	temps (s)
Moyenne	4,6	31	2393
Reproductibilité	5,5	24	2401

Le tableau 4.7 montre que pour ce câble, la reproductibilité de la mesure est mauvaise. En effet, même avec une incertitude de 3%, la valeur mesurée lors de l'essai de reproductibilité est en dehors de la fourchette $(31 \pm 3)\%$ définie par la mesure de répétabilité.

c) Conclusions

Les essais réalisés sur la solution de toluène montrent une bonne robustesse du capteur. En effet, les valeurs mesurées sont proches et l'écart à la moyenne reste très faible. L'installation permet une mesure précise et reproductible.

D'après nos résultats, pour les essais sur ce câble, l'incertitude de la mesure augmente par rapport à l'essai sur le toluène 10%. Cette incertitude est due à l'échantillon. Pour comparer deux câbles, par exemple deux échantillons de productions différentes, il faut réaliser les essais le même jour car les essais ne sont pas reproductibles.

Chaque câble possède ses particularités de construction, chaque câble offrira certainement des capacités de répétabilité et reproductibilité différentes. Pour les câbles produits en grand volume et certifiés Low Smoke, des essais de répétabilité et reproductibilité permettraient de quantifier l'incertitude en fonction du type de câble.

V.2) Propagation de flamme IEC-60332-1

Des essais de répétabilité sont réalisés sur un câble échantillon de type LAN suivant le standard IEC-60332-1 (flamme de 1 kW).

a) Essais de répétabilité

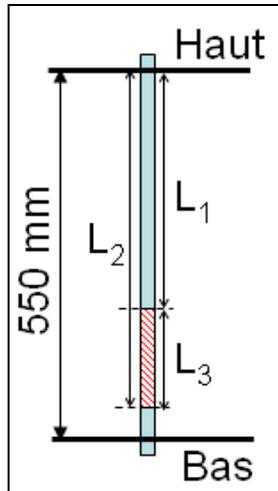


Figure 4.26 : mesure pour l'essai IEC 60332-1

Pour chaque essai, comme le montre la figure 4.26, on mesure :

- L_1 : entre l'attache haute et la fin de propagation haute
- L_2 : entre l'attache haute et la fin de propagation basse
- L_3 : la longueur de combustion = $L_2 - L_1$

Les mesures de L_1 et L_2 sont exigées par le standard et mesurées au millimètre. En plus de ces deux mesures, la mesure de la durée de propagation de la flamme est réalisée (une fois le brûleur retiré).

Tableau 4.5 : Essais de répétabilité du test IEC 60332-1

Essais	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	Durée de la flamme (s)
1	292	458	166	76
2	325	460	135	70
3	321	456	135	71
4	310	445	135	72
5	330	451	121	66
6	320	446	126	62
7	319	450	131	80
8	340	450	110	50
9	314	462	148	72
10	335	445	110	63
11	328	452	124	68
12	313	457	144	74
13	319	448	129	51
14	320	447	127	65
15	316	446	130	51
Moyenne	320	452	131	66
Ecart type	11	6	14	9

Le tableau 4.5 récapitule les résultats des 15 essais de répétabilité. Pour L_1 , la moyenne est 320 mm et l'écart type de 11 mm, ceci montre une faible dispersion. Même observation pour les mesures de L_2 , les écarts types donnent des dispersions encore moins élevées, ceci s'explique par le fait que la propagation de la flamme se fait surtout vers le haut, la distance parcourue vers le bas de l'échantillon est faible. La durée moyenne avant l'extinction de la flamme est 66 secondes et son écart type est de 9 secondes, la variation

est importante, et l'incertitude élevée par rapport à la mesure. En prenant des incertitudes égales à 3 fois les écarts types les résultats de la mesure sont les suivants :

- $L_1 = (320 \pm 30) \text{ mm}$
- $L_2 = (452 \pm 20) \text{ mm}$
- **Durée de flamme = $(66 \pm 27) \text{ secondes}$**

Pour $L_3 = L_2 - L_1$, l'incertitude absolues $\Delta L_3 = \Delta L_2 + \Delta L_1$, soit :

- $L_3 = (131 \pm 50) \text{ mm}$

b) Essai de reproductibilité

L'essai de reproductibilité est réalisé trois semaines plus tard avec le même câble (provenant de la même production que les essais de répétabilité).

Tableau 4.6 : Essai de reproductibilité du test IEC 60332-1

Essais	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)
Moyenne	320	452	131
Reproductibilité	310	455	145

Les valeurs en tableau 4.6 montrent une bonne reproductibilité de l'essai. Les mesures de l'essai de reproductibilité se trouvent dans la fourchette d'incertitude de la moyenne réalisée avec les essais de répétabilité.

c) Conclusion

Pour l'essai IEC 60332-1 sur un câble de type LAN, l'essai est répétable et reproductible. Grâce à ces résultats, au delà de l'exigence du standard, une variation importante de la mesure entre deux câbles LAN différents (ligne de fabrication différente, matières premières différentes...) montre une réelle variation des propriétés du câble.

Ces résultats s'appliquent pour les câbles LAN avec ces matières premières de construction. Ces résultats ne peuvent s'appliquer directement sur un câble de construction différente ou sur des matières premières très différentes, par exemple gainage PVC et gainage HFFR. Pour les câbles de grandes diffusions ce type d'essais doit être entrepris, si les résultats sont comme pour le câble LAN testé, le test sera un indicateur qualité du produit.

V.3) Autres essais standards

Les essais de répétabilité et reproductibilité peuvent être réalisés sur les installations où une mesure est réalisée, c'est le cas de l'essai de propagation d'incendie IEC 60332-3, pour l'essai de la mesure de la corrosivité IEC 60754-1 et IEC 60754-2, et pour l'essai de mesure d'indice d'oxygène ISO-4589. Pour l'essai de résistance à l'incendie IEC 60331, l'essai ne teste que la présence ou non d'un court circuit, la répétabilité de l'essai ne permet pas de définir une moyenne ou un intervalle d'incertitude, la répétabilité montrera juste les capacités de l'essai à donner la même réponse.

VI. Formation des personnes aux réalisations des essais

Pour finaliser la mise en service du laboratoire, des essais doivent être réalisés. Ceci implique la présence de personnes capables de réaliser les essais. Pour réaliser ces essais, les opérateurs doivent connaître les principes de base de sécurité, les installations et les essais standards. Le site ne dispose que d'une personne capable de faire les essais, c'est un technicien qui réalise déjà les essais physico-chimique sur les matières premières. Le personnel généralement utilisé pour les essais en laboratoire possède un niveau technique faible (équivalent français du BEP ou Bac Professionnel), pour les former à la réalisation des essais il faut prendre ce point en considération.

Les essais sont décrits par des articles standards en plusieurs dizaines de pages et en anglais (par exemples plus de 60 pages pour l'essai de propagation de flamme). La lecture et l'imprégnation de l'essai est difficile pour le personnel, car d'une part, l'article standard est en anglais. D'autre part, les installations présentées dans leurs articles standards sont des croquis qui définissent les cotations des appareils mais ils n'illustrent pas les installations présentes dans le laboratoire, ainsi que leur fonctionnement. Par exemple, le standard pour l'essai de mesure du pourcentage d'HCl dans les fumées (II.5 de ce chapitre) utilise un programmeur avec une régulation PID, pour faire l'essai, l'opérateur doit savoir programmer le système de régulation et l'article standard ne peut aider l'opérateur pour cette tâche. Pour réaliser les essais efficacement sur les installations du site et en respectant les articles standards, j'ai pris l'initiative de réaliser des modes opératoires des essais pour la (et les futures) personne(s) destinée(s) à réaliser les essais. Pour chaque essai les modes opératoires contiennent :

- Le détail de l'appareillage d'essai
- Les outils nécessaires pour réaliser l'essai
- Les précautions et les consignes de sécurité
- Les références aux standards
- La préparation des échantillons à tester
- Le protocole de réalisation de l'essai lié à l'installation
- Le protocole à suivre lors des mesures

Grâce à ces modes opératoires, l'opérateur est guidé tout au long de l'essai. Les articles standards y sont synthétisés. Les étapes de préparation et l'utilisation des machines sont détaillées et illustrées avec des photographies.

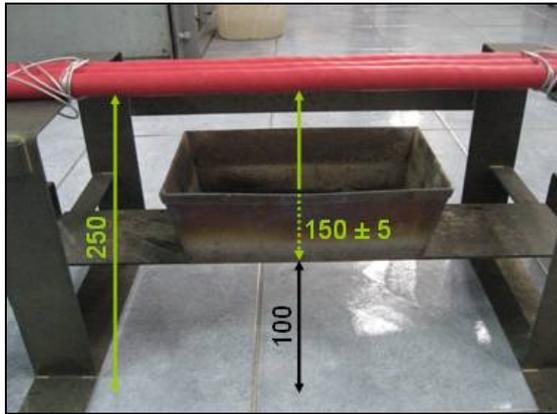


Figure 4.27 : Exemple d'illustration pour la rédaction des modes opératoires

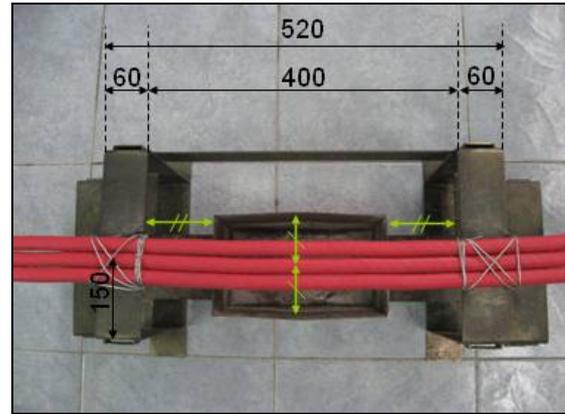


Figure 4.28 : Exemple d'illustration pour la rédaction des modes opératoires

Les figures 4.27 et 4.28 montrent les types d'illustrations qui aident l'opérateur pour positionner et attacher l'échantillon sur le présentoir, lors de l'essai de densité de fumées.



Figure 4.29 : Exemple d'illustration pour la rédaction des modes opératoires

La figure 4.29 provient du mode opératoire pour l'essai de propagation de flamme, cette photographie, prise durant un essai, montre comment la flamme de 1 kW doit être placée face à l'échantillon. Sur cette photographie, le cône bleu de la flamme qui effleure la surface du câble est nettement visible. On y voit aussi clairement, l'angle de 45° formé par le brûleur ainsi que l'attache de l'échantillon à l'aide de pince.

La simple vue de cette photographie, permet au technicien d'avoir un aperçu général de l'essai, avec l'utilisation du matériel à sa disposition.

Toutes les illustrations sont réalisées à partir des photographies prises durant les essais, l'environnement de travail et les installations sont alors présentés tels quels dès la première lecture. Au-delà de l'article standard, les modes opératoires qui sont rédigés familiarisent en plus le technicien avec son environnement de travail.

Les modes opératoires synthétisent à eux seuls les standards et les modes d'emplois des installations. Par exemple, pour réaliser les essais sur les fumées émises lors de la combustion (IEC 60754-1 & 2), les standards comportent environ 50 pages chacun, le manuel d'utilisation du contrôleur PID du four est d'environ 200 pages et le manuel d'utilisation du pH-mètre est d'environ 100 pages. Le mode opératoire qui détaille les deux essais est illustré, il permet à l'opérateur d'utiliser les appareils et de réaliser l'essai

efficacement. Ce mode opératoire ne comporte que 49 pages en langue turque, soit moins que la somme des deux standards, il permet donc un gain de temps important lors de la lecture et surtout une compréhension plus rapide, car il est dans la langue maternelle des techniciens et il s'appuie sur les appareils utilisés dans le laboratoire.

VII. Conclusions sur la mise en service du laboratoire

Les travaux liés à la mise en service du laboratoire débutèrent à la mi-novembre 2009 et durèrent environ 4-5 mois. Durant ce temps, les installations fournies par le FFT furent placées, raccordées, modifiées, testées... L'éloignement entre le site de Tuzla et la société FFT basée en Suisse obligea un grand nombre d'échanges par mail, pour faire fonctionner certains appareils. Les manuels d'utilisations peu clairs et peu détaillés sont les causes principales des difficultés rencontrées. Ces zones d'ombres ont été listées et chaque solution a été répertoriée en cas de problèmes similaires dans le futur.

La mise en service d'un laboratoire concerne aussi la prévision de l'approvisionnement des consommables. Le choix d'un fournisseur fut rapide, comme beaucoup de sociétés de vente de produits chimiques sont basées à Istanbul, nous avons choisi celui qui offre les meilleurs délais de livraisons et des tarifs compétitifs.

Un autre aspect est celui de la sécurité. Les risques d'incendie, dans un laboratoire où le feu est omniprésent, sont élevés. Ces risques sont pris en compte et des mesures sont prises pour lutter contre eux.

Une fois les machines installées les essais de conformité sont réalisés. Des comparaisons avec les résultats d'autres laboratoires du groupe sont prévues.

Enfin pour favoriser la formation des techniciens, des outils sous forme de manuels sont mis en place.

CHAPITRE 5 : COMPARAISONS DES COMPORTEMENTS DE COMBUSTIONS DES CABLES NEXANS

Afin d'illustrer l'application du laboratoire quelques essais sont réalisés sur des câbles échantillons.

Comme nous l'avons vu, un câble peut être construit à partir d'un schéma très simple, c'est le cas d'un câble de type LAN Cat 5 qui est composé de 8 fils élémentaires gainés, mais aussi à partir de schémas très compliqués, c'est souvent le cas pour les câbles destinés au transport d'énergie, pour ces câbles beaucoup d'éléments supplémentaires peuvent être présents (gaine interne, armure de protection, écran métallique...). Ces différences de construction impactent à leurs manières les phénomènes liés à leurs combustions.

D'autre parts, sur un même câble au design quelconque, les matières premières ou le procédé peu être différent d'une série à l'autre. Le lot de la matière première, la ligne de production, la vitesse de rotation de l'extrudeuse... sont des paramètres qui peuvent varier et impacter les résultats des essais. Des essais sur des câbles, de construction identique et avec des matières première différentes, seront réalisés.

Ce chapitre servira donc à montrer l'impact de la construction du câble, des matières premières et des procédés de fabrication sur les résultats des essais de combustions.

I. Densité de fumées sur des câbles de gros diamètre : standard IEC-60134

I.1) Echantillons

Les échantillons testés sont des câbles de transports d'énergies avec et sans protections physiques. Les polymères présents sont du PVC, du LSZH (Low Smoke Zero Halogene) et du polyéthylène réticulé PE-R.

I.2) Câble d'énergie avec écran aluminium et armure en acier

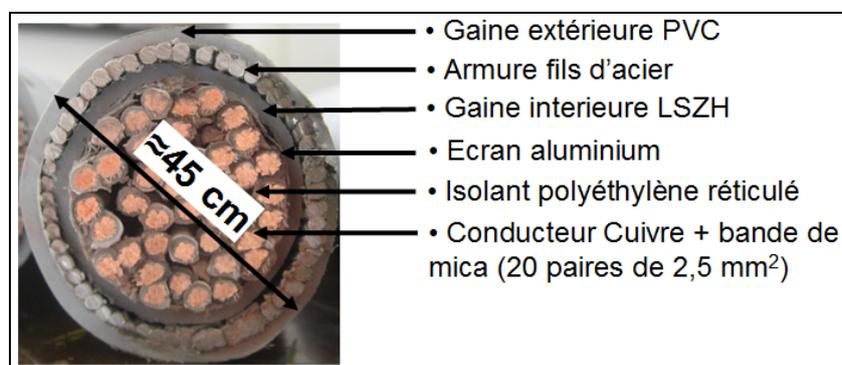


Figure 5.1 : Construction du câble testé

Le résultat de l'essai suivant le standard donne une transmission minimum de lumière égale à **27,3%**. Cette valeur est atteinte en fin d'essai à 2398 secondes. La transmission minimum est enregistrée en fin d'essai, ceci montre que l'émission de fumées a été croissante durant tout l'essai, car la quantité de fumée a toujours augmenté dans la cabine d'essais.

Malgré un grand dégagement de fumées le câble n'a pas complètement brûlé pendant l'essai. Une analyse qualitative de la combustion est réalisée sur ce tronçon de câble.



Figure 5.2 : Analyse de la combustion

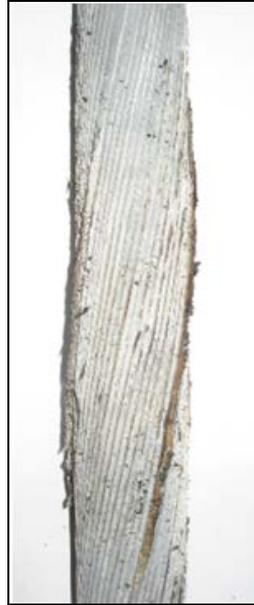


Figure 5.3 : Analyse de la combustion

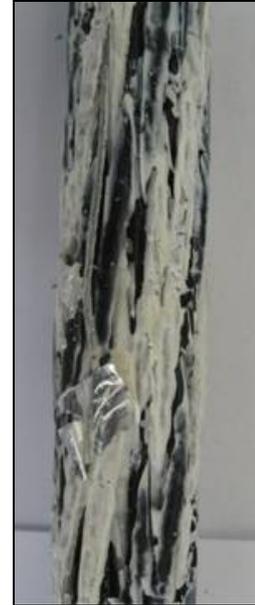


Figure 5.4 : Analyse de la combustion

Les photographies en figure 5.2, 5.3 et 5.4 montrent le câble après l'essai.

- La photographie 5.2 montre que la partie de la gaine extérieure exposée aux flammes a été carbonisée et l'armature en acier est noircie.
- Sur la photographie 5.3 la gaine interne en LSZH a été en partie protégée des flammes grâce à l'armure en acier. Elle n'est pas complètement brûlée, sous l'effet de la chaleur l'armature a laissé son empreinte sur le polymère ramolli.
- La photographie 5.4 montre les isolants PE-R qui se trouvent sous l'écran aluminium. Sous l'effet de la chaleur, les isolants ont complètement fondu mais ne semblent pas avoir subi de combustion.

I.3) Câble d'énergie sans protection

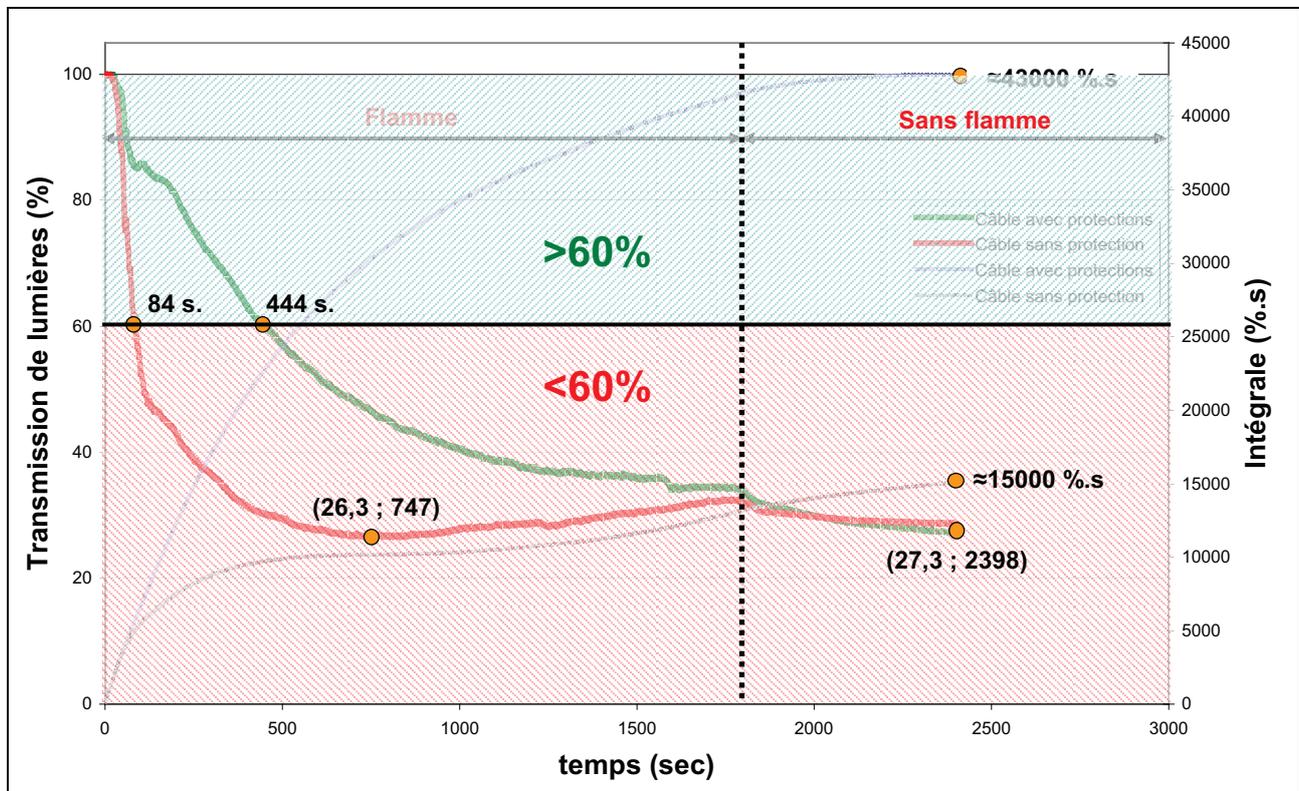
L'essai de densité de fumées est réalisé sur le même câble après avoir retiré l'écran aluminium et l'armure en acier.

Le résultat de l'essai suivant le standard donne une transmission minimum de lumière égale à **26,3%**. Cette valeur est enregistrée en début d'essai à 747 secondes. Ce second résultat montre que les protections n'impactent pas la valeur de la transmission de lumière minimum. Cependant, le temps pour obtenir ce minimum est beaucoup plus rapide sans l'armure.

Après l'essai, les parties en contact avec les flammes sont complètement carbonisées. Il ne reste que les conducteurs avec les bandes de mica.

La comparaison des résultats et des observations de combustion permettent de dire dans un premier temps, qu'une protection physique du câble limite la combustion de ce dernier. Dans un second temps, on peut dire que cette même protection ralentit le dégagement de fumée durant l'incendie.

Malgré une combustion moins importante pour le câble armé (seule la gaine extérieure est réellement endommagée), les valeurs de transmission minimum peuvent être considérées comme identiques pour les deux câbles. Une comparaison des données enregistrées durant les essais peut apporter des précisions sur les phénomènes durant la combustion.



Graphique 5.1 : Comparaison des courbes de transmission de lumière

A partir des données enregistrées, il est possible de créer le graphique 5.1 ci-dessus. L'étude de la transmission de la lumière (courbes vert et rouge) montre effectivement que le câble sans protection émet plus rapidement la fumée. Les profils des deux courbes sont complètement différents pendant la période avec la flamme. La transmission de lumière enregistrée pour le câble sans protection remonte après son minimum, ceci peut s'expliquer par une émission trop rapide qui handicape l'homogénéité dans la pièce. Dans les deux cas, l'extinction de la flamme de la solution d'alcool est nettement mise en évidence par un point d'inflexion. Dans cette deuxième partie qui se caractérise par l'émission de fumées sans flamme, les échantillons adoptent un profil de courbe identique et les valeurs finales sont proches pour les deux échantillons.

L'étude des courbes intégrales (courbes bleu et gris) montre que durant la totalité de l'essai, le câble armé a laissé passer plus de lumière que le câble sans protection. La lumière totale transmise est environ trois fois plus importante pour le câble armé.

I.4) Conclusion sur l'impact des protections sur la densité de fumées

Dans les deux cas les échantillons testés donnent des valeurs de transmission minimum quasiment identiques, on peut donc penser que la grande majorité de la fumée

est émise par la gaine externe en PVC, car c'est la partie qui à brulé dans les deux cas, alors que l'isolant et la gaine interne n'ont pas subi de combustion pour le câble armé. Malgré ces valeurs quasi identiques de transmissions de lumières, nous remarquons que l'armature retarde considérablement l'émission des fumées. Sans l'armature la transmission de lumière, égale à 60%, est atteinte environ 5 fois plus rapidement (84 secondes contre 444 secondes pour le câble protégé). En cas d'incendie, le câble armé permettra d'avoir une meilleure visibilité durant les premières minutes du sinistre.

II. Essai d'intégrité du circuit durant un incendie : résistance aux incendies IEC-60331

II.1) Echantillon

Le câble testé est de type instrumentation et de couleur noire. Il est composé de 30 paires, soit 60 conducteurs de 7 couleurs différentes (15 blancs, 15 rouges, 6 verts, 6 marron, 6 bleus, 6 gris, 6 orange). Le conducteur métallique est du cuivre. Pour permettre l'intégrité des circuits durant un incendie, le cuivre est entouré par une couche de mica. Le câble est conçu pour une tension assignée de 120 Volts.

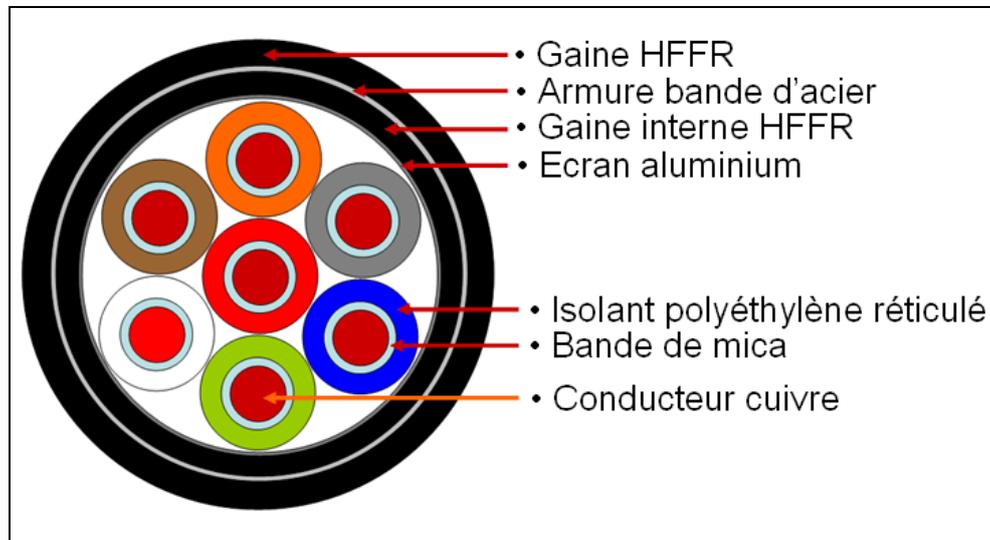


Figure 5.5 : Schéma simplifié de la vue de coupe du câble testé.

La figure 5.5 schématise la construction du câble. Pour simplifier, les 30 paires ne sont pas représentées sur le schéma, chaque conducteur de la même couleur est représenté sur le schéma en un seul conducteur. Les conducteurs sont d'abord protégés par un écran aluminium. Une gaine interne en HFFR (Halogene Free Fire Retardant) enrobe l'écran aluminium. Par-dessus la gaine interne, une armature par ruban d'acier finit de protéger le câble. Enfin, la gaine extérieure en HFFR finit la construction du câble.

II.2) Essai IEC-60331

L'essai est réalisé suivant le standard IEC60331, c'est-à-dire avec une flamme de 750°C minimum et 800°C maximum appliquée pendant 90 minutes. La tension appliquée est la tension assignée du câble, c'est-à-dire 120 Volts. La tension est appliquée pendant encore 15 minutes une fois que la flamme a été stoppée.

Le courant est émis par 4 phases et il passe par tous les conducteurs du câble. La probabilité de créer un court-circuit est alors maximum. Les conducteurs sont donc

regroupés par couleurs. Les conducteurs blancs et rouges sont les plus nombreux, ils se partagent chacun une phase. Les deux phases restantes alimentent les conducteurs oranges, bleus, marrons, gris et verts. Certaines couleurs sont donc regroupées, par exemple vert + gris et bleu + orange + marron. Les essais sont répétés 3 fois, avec à chaque fois un regroupement différent des couleurs.

Durant l'essai le brûleur est alimenté par 77 l.min⁻¹ d'air et 5 l.min⁻¹ de propane à 1 bar absolu.

Pour les 3 essais réalisés il n'y a pas eu de court-circuit pendant toute la durée des essais (90 minutes sous flamme et 15 minutes supplémentaires sans flamme). Les bandes de mica ont joué leurs rôles qui empêchent les conducteurs de rentrer en contact une fois que toutes les matières plastiques ont été brûlées.

II.3) Essais dans les conditions IEC60331 mais avec une tension supérieure

Comme on l'a vu, le câble répond aux exigences du standard IEC60331. Dans le standard la tension appliquée est la tension assignée du câble (120 Volts). On se propose de réaliser des essais avec une tension appliquée supérieure. Les résultats permettront de voir l'impact de la tension sur le résultat de l'essai. De plus pour ce type d'essai la norme Allemande demande une tension fixe de 400 Volts quel que soit le type de câbles.

a) Tension de 500 Volts

La tension appliquée est de 500 Volts et la flamme est alimentée par les mêmes débits d'air et de propane (respectivement 77 l/min et 5 l/min). Il n'y a pas de court-circuit, le câble conserve son intégrité même sous 500 Volt.

b) Tension de 700 Volts

La tension est augmentée à 700 Volts. Le câble continue de conserver son intégrité, il n'y a pas de court circuit sous 700 Volts.

c) Tension de 900 Volts

La tension est augmentée à 900 Volt. Il se crée un court-circuit. A 900 Volt et sous un incendie l'intégrité du circuit du câble n'est pas conservée.

II.4) Conclusions sur l'intégrité du câble soumis à un incendie

La première conclusion, que l'on peut tirer de ces essais, est que le câble testé sous les conditions standards offre des résultats en accord avec les exigences du standard IEC60331.

Dans les essais où la tension varie, on remarque qu'au delà d'une certaine tension il se crée un court-circuit. Ces essais montrent que l'isolation au mica est efficace jusqu'à une certaine limite de tension. En effet, pour une valeur de 900 Volts, un court circuit est apparu. En raison d'une différence de potentiel élevée, aux moindres défauts d'isolation du mica, un arc se crée et génère le court-circuit.

Ces essais mettent en évidence l'importance de la tension assignée. Pour un autre type de câble, avec une tension assignée de 0,6/1 kV par exemple, si l'enrobage du conducteur par un ruban de mica est identique à celui du câble de nos essais, les probabilités d'avoir un court-circuit sont élevées. Pour éviter le court-circuit il faut envisager diverses modifications comme augmenter l'épaisseur de la couche de mica, utiliser une nouvelle source de mica ou bien revoir le procédé de fabrication.

III. Comparaison des essais de propagation de flamme IEC60332-1 et de propagation d'incendie IEC60332-3

Les essais de propagations de flammes et de propagation d'incendie font apparaître des similitudes. Dans les deux cas, les échantillons sont placés verticalement, une source d'énergie brûle les câbles à leur base et en fin d'essai la partie carbonisée est mesurée. La comparaison de ces essais, réalisés sur un même câble, vise à montrer leurs différences.

III.1) Echantillon

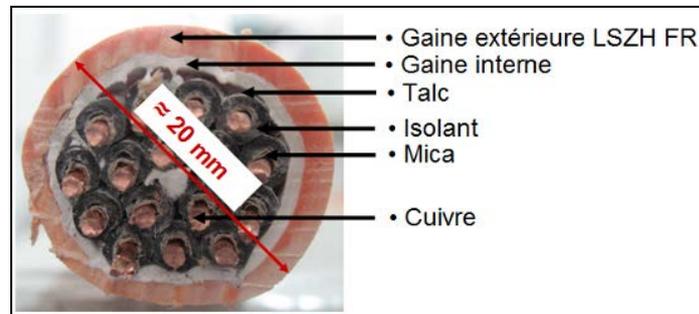


Figure 5.6 : Coupe de l'échantillon testé suivant les deux types d'essais

La figure 5.6 est une photographie du câble en vue de coupe. Le câble testé a un diamètre d'environ 20 mm. Il est composé de 16 conducteurs en cuivre solide de 1,5 mm². La gaine extérieure est en matériau Low Smoke Zero Halogene Flamme Retardant (LSZH FR). Une gaine interne est utilisée pour créer une cohésion entre les fils élémentaires. Le talc utilisé permet de ne pas coller la gaine interne à l'isolant en polyéthylène réticulé. Une couche de mica recouvre le cuivre.

III.2) Essais de propagation de flamme suivant la norme IEC 60332-1

L'échantillon est un tronçon de 60 cm du câble en figure 5.6. Le tronçon est testé sous les conditions du standard IEC60332-1 (flamme de 1 kW, chapitre 4 - II.1)).



Figure 5.7 : Application de la flamme



Figure 5.8 : Propagation de la flamme



Figure 5.9 : Extinction de la flamme

La figure 5.7 montre la flamme de 1 kW appliquée au tronçon de câble. En raison du diamètre du câble de 20 mm, la durée d'application est de 2 minutes.

La figure 5.8 montre la propagation verticale de la flamme le long du câble.

La figure 5.9 montre l'extinction de la flamme. La flamme doit s'éteindre d'elle-même.

La mesure de la zone non-carbonisée, demandé par le standard, qui se trouve dans la partie supérieure du câble est réalisée. Cette mesure montre indirectement la distance parcourut par la flamme, plus la mesure est grande plus la distance parcourue par la flamme est faible.

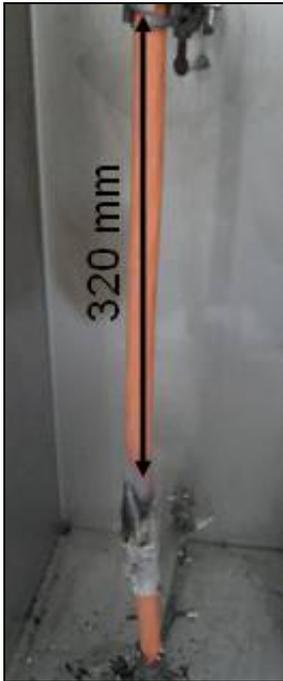


Figure 5.10 : Mesure de l'essai



Figure 5.11 : Observation de la combustion

La figure 5.10 montre la mesure de la partie non-carbonisée. La valeur est de 320 mm. Cette valeur est largement supérieure à 50 mm, **le câble testé répond donc aux exigences du standard IEC-60332-1.**

L'observation de la combustion après l'essai montre que la gaine a brûlé surtout dans sa partie exposée à la flamme. En figure 5.11, des boursoufflures se sont formées sur la gaine. Ces boursoufflures sont un signe caractérisant l'agent retardateur de flamme. La gaine interne n'est pas complètement brûlée, elle est déchirée manuellement pour observer l'état des isolants. Comme le montre la figure 5.11, les isolants sont quasiment intacts après l'essai, la poudre observée sur les isolants est du talc.

III.3) Essais de propagation d'incendie suivant la norme IEC60332-3

Le même câble est testé dans la cabine d'essai de propagation d'incendie. Les tronçons de câbles ont une longueur de 3,5 mètres. Le nombre de tronçons de câbles offre un volume de combustible de 3,5 litres par mètre d'échantillon, soit un total de 6 câbles. La flamme est fournie par un brûleur horizontal alimenté par environ 1540 mg.min⁻¹ d'air et 440 mg.min⁻¹ de propane. La durée prévue pour l'application de la flamme est de 20 minutes. Durant le test, un courant d'air circule du bas vers le haut dans la cabine.



Figure 5.12 : Combustion des câbles sur l'échelle



Figure 5.13 : Tronçons de câbles sur l'échelle après l'essai

La figure 5.12 montre les tronçons de câble attachés en position verticale sur l'échelle ainsi que le brûleur qui provoque la combustion.

Durant les deux premières minutes de l'essai les câbles restent intacts, ils commencent ensuite par gonfler et des fissurations apparaissent. L'amorce de l'incendie est donnée au bout de 4-5 minutes, les flammes se propagent alors verticalement et rapidement, la combustion s'emballe et au bout de 10 minutes on préfère stopper prématurément le brûleur, car le câble les flammes atteignent déjà le sommet de la cabine (situé à 4 mètres). Le câble brûle pendant environ 35 minutes, soit 25 minutes sans source extérieure de chaleur.

La figure 5.13 montre les tronçons de câbles attachés sur l'échelle après l'essai. Tous les matériaux inflammables ont été entièrement brûlés (isolant, gaine intérieure et extérieure). Il ne reste que les conducteurs et les bandes de mica.

Le câble propage les incendies et brûle entièrement.

III.4) Conclusion sur la comparaison des essais de propagations de flamme et d'incendie

D'après l'essai de propagation de flamme, le câble est constitué de matériaux qui empêchent une flamme de se propager verticalement sur sa longueur. Cependant, lors de l'essai d'incendie, les températures auxquelles sont soumis les polymères, ainsi que l'effet de cheminée, sont tellement importants que les câbles brûlent complètement. Les matériaux utilisés propagent l'incendie.

Ces résultats montrent donc l'importante différence entre les deux essais, bien qu'ils caractérisent tous les deux le pouvoir retardateur de flamme d'un matériau. Dans nos essais, un même matériau empêche une flamme seule de se propager mais permet à un incendie de proliférer...

Lors du choix d'une matière première ou lors de son remplacement pour la construction d'un câble, il est nécessaire de tenir compte de tous ces essais et ne pas limiter l'étude à l'essai de propagation de flamme.

IV. Impact de l'épaisseur de la gaine sur la propagation de flamme : IEC60332-1

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, l'épaisseur d'un matériau impacte la combustion. Dans cette partie, l'impact de l'épaisseur de la gaine sur la propagation de la flamme verticale sera étudié. Les essais suivants sont réalisés sur des échantillons de type LAN, dont les épaisseurs des gaines se trouvent en limite basse et haute du cahier des charges. Pour régler l'épaisseur du gainage la vitesse de rotation de la vis d'extrusion varie, lorsqu'elle augmente l'épaisseur augmente et inversement. La tête d'extrusion n'est pas changée.

IV.1) Echantillons

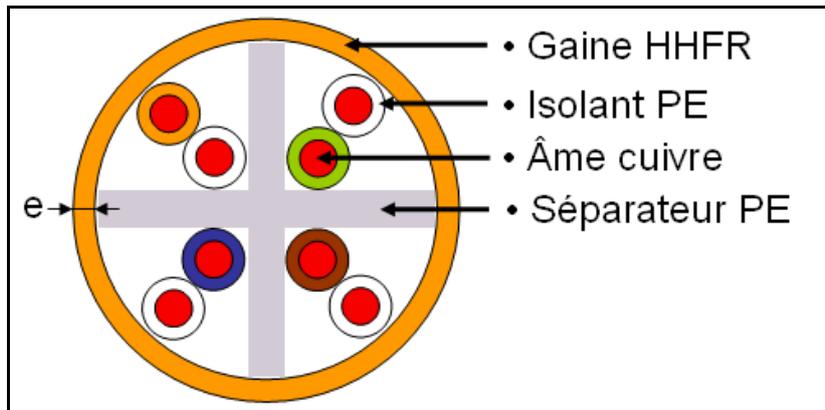


Figure 5.14 : Echantillon LAN avec une épaisseur de gaine variable

La figure 5.14 illustre l'échantillon LAN avec l'épaisseur de gaine e variable. Le câble est composé de 4 paires de conducteurs twistés et séparés par un cross-member. L'âme est en cuivre, l'isolant et le séparateur sont en PE. La gaine en HHFR a une épaisseur maximum notée e_{max} , correspondant à la limite haute du cahier des charges et une épaisseur minimum notée e_{min} , correspondant à la limite minimum du cahier des charges. Le diamètre extérieur du câble est d'environ 6 mm.

IV.2) Résultats des essais de propagation de flamme IEC 60332-1

L'essai est réalisé avec une flamme de 1 kW. La mesure est illustrée dans la figure 5.10. Les résultats sont les suivants :

- $e_{max} = (330 \pm 30) \text{ mm}$
- $e_{min} = (310 \pm 30) \text{ mm}$

Les deux valeurs sont très supérieures à 50 mm, les câbles sont donc conformes au standard IEC 60332-1.

IV.3) Conclusion sur l'impact de l'épaisseur du gainage sur la propagation de flamme

Les résultats sont compris dans des plages d'incertitude qui se recoupent. D'après ces résultats d'essais, en restant dans les contraintes du cahier des charges, l'épaisseur de la gaine permet de satisfaire les exigences du standard sur les limites basses et hautes. Le même câble a été testé avec une épaisseur de gaine moyenne, il offre le même résultat. A la vue de tous ces résultats, pour une épaisseur de gaine comprise entre les bornes du cahier des charges, on peut espérer que le câble soit conforme au standard IEC 60332-1.

V. Impact du masterbatch (agent colorant) et du matériau de gainage

V.1) Echantillons

Les échantillons sont trois câbles de type LAN illustré sur la figure 6.14 :

- Echantillon 1 : Couleur orange et gaine HFFR
- Echantillon 2 : Couleur blanc et gaine HFFR
- Echantillon 3 : Gaine PVC (coloration gris)

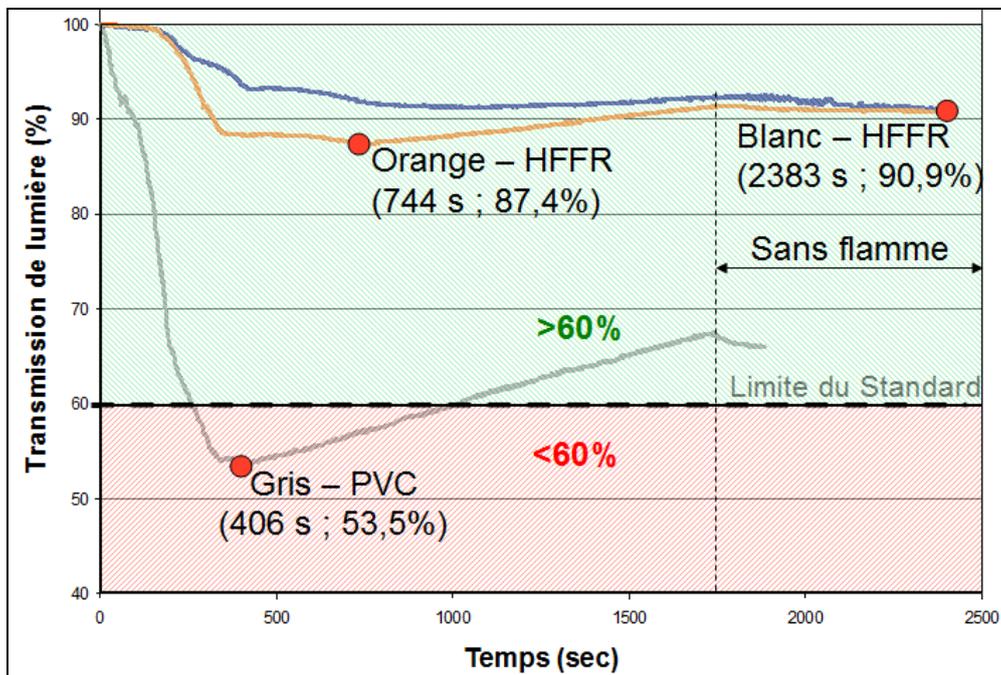
Pour ces trois échantillons, les essais de propagation de flamme IEC 60332-1, de densité de fumées IEC 61034 et de %HCl IEC 60754-1 sont réalisés.

V.2) Essais de propagation de flamme IEC 60332-1

Tableau 5.1 : Essais de propagation de flamme sur câbles LAN			
Echantillons	Orange / HFFR	Blanc / HFFR	PVC
Résultats (mm)	327 ± 30	330 ± 30	327 ± 30

Les résultats, en tableau 5.1, sur les trois échantillons sont identiques. Ils ne montrent aucun impact du masterbatch et de la nature du gainage sur la propagation de flamme.

V.3) Essais de densité de fumées IEC 61034



Graphique 5.2 : Essais de densité de fumées sur câble LAN

Le graphique 5.2 montre les courbes de transmission de lumière pour les trois échantillons. Les valeurs conformes au standard sont hachurées en verts et les non-conformes sont hachurées en rouges. Les zones où l'alcool est enflammé et où sa combustion est terminée sont définies, grâce aux observations expérimentales, nous avons vu que la combustion de l'alcool s'arrête au moment d'une rechute de la transmission de lumière autour de 1700 secondes.

Une première observation montre que le gainage HFFR offre des transmissions de lumières supérieures et conformes au standard. La gaine PVC est non-conforme au standard.

Les trois courbes offrent des profils différents. Les courbes des matériaux HFFR (bleu et orange) montrent une période dormante durant laquelle il n'y a pas d'émission de fumées. Après la période dormante, les deux matériaux émettent de la fumée à des vitesses proches, les courbes bleue et orange sont alors confondues. Lorsqu'elles se différencient, la gaine blanche reste toujours au dessus (courbe bleue) et décroît par plateaux plus lentement que la gaine orange (courbe orange), elle atteint une valeur minimum en présence de la flamme puis croît jusqu'à l'extinction de la flamme. La gaine orange émet rapidement sa fumée et atteint son minimum de transmission de lumière de 87,4% en 12 minutes, puis la courbe croît jusqu'à l'extinction de l'alcool.

La gaine PVC émet tout de suite de la fumée et la transmission de lumière minimum atteinte est de 53,5% en moins de 7 minutes. La transmission de lumière croît ensuite rapidement jusqu'à l'extinction des flammes de l'alcool.

Une fois la combustion de l'alcool terminée, les courbes se remettent à chuter, la gaine blanche HFFR atteint alors sa transmission de lumière minimum de 90,9% en 40 minutes. A cet instant les valeurs des transmissions de lumière des gaines HFFR sont identiques.

Echantillons	Orange / HFFR	Blanc / HFFR	PVC
transmission (%)	87,4	90,9	53,5
Durée (sec)	744	2383	406

Le tableau 5.2 récapitule les résultats pour les trois échantillons. Au vu des courbes et des résultats, le PVC émet beaucoup de fumées et rapidement, plus rapidement que l'homogénéisation des fumées dans la cabine d'essai. Les gaines HFFR émettent peu de fumées et le colorant impacte très peu sur les résultats des essais. La transmission de lumière minimum est proche dans les deux cas des gaines HFFR.

V.4) Dosage des ions chlorures dans les fumées de combustion IEC 60754-1

Le dosage des ions chlorures est effectué sur les trois gaines.

Echantillons	Orange / HFFR	Blanc / HFFR	PVC
Résultats (mg/g)	<5	<5	81

Le tableau 5.3 donne les valeurs d'HCl émises par la combustion des gaines en mg par gramme d'échantillon. Les matériaux HFFR donnent comme prévu des valeurs inférieures à 5 mg, les mesures de pH et conductivité doivent confirmer que les gaines HFFR sont sans halogènes. Le PVC utilisé émet 81 mg d'HCl par gramme d'échantillon.

V.5) Conclusion

La propagation de flamme est identique pour tous les échantillons testés, il n'y a pas d'impact du gainage et du colorant. La densité de fumées est élevée pour le PVC et faible pour les gaines HFFR, les valeurs pour les gaines HFFR sont proches mais les profils

des courbes de transmissions de lumières se différencient un peu. Les fumées des gaines HFFR sont libres d'HCl alors que, comme prévu, le PVC en rejette.

VI. Conclusions sur les essais

Les essais réalisés dans ce chapitre montrent des différences ou similitudes de résultats suivant la construction du câble, le procédé de fabrication ou les matières premières.

Lors d'une combustion, un câble armé propage ses fumées moins vite qu'un câble sans armure. Comme nous l'avons vu, un câble qui ne propage pas de flamme peut propager un incendie, la combustion d'une gaine en PVC émet 8% d'HCl, le respect du cahier des charges donne des résultats conformes au standard...

Les paramètres qui impactent les résultats d'essais sont importants. Afin d'offrir des produits conformes aux normes, chaque changement de ces paramètres nécessite un contrôle du produit fini. Chaque contrôle renseigne la qualité des matières premières, du procédé et du produit ainsi que sa stabilité.

CHAPITRE 6 : PROGRAMME VBA POUR ENREGISTRER, CALCULER, COMPARER ET PRESENTER LES RESULTATS

La mise en service d'un nouveau laboratoire avec des nouveaux essais implique l'acquisition de résultats et ainsi la capacité de créer une base de données. Dans cette optique d'archivage et de normalisation des résultats, j'ai proposé de créer un programme en VBA pour à la fois enregistrer, archiver et standardiser la présentation des résultats des essais. Le programme est entièrement conçu et rédigé par moi-même. Cependant, l'aide des spécialistes du câble, tel que Sultan Dinçer et Kamil Mutlu, fût utile pour toute la partie du programme qui faisait intervenir le design des câbles.

I. Généralités et besoins

I.1) Vue d'ensemble

Le nouveau laboratoire d'essais incendie de Tuzla possède six appareils capables de réaliser un grand nombre d'essais suivant les différents articles standards. Les essais peuvent être réalisés sur les câbles ou les matières premières ou encore les deux à la fois.

En résumant, nous avons donc :

- Un laboratoire
- Plusieurs essais réalisables
- Des câbles et des matières premières
- Des résultats

I.2) Besoins

Lié au service Qualité Contrôle, le laboratoire fourni des résultats afin de vérifier la validité et le respect du cahier des charges des produits ou des matières premières. Une fois les essais réalisés suivant les articles standards en vigueur, lors de la présentation des résultats, il est important d'avoir les informations liées à l'échantillon testé (lieux de production, numéro de série, de traçabilité...), la date et les conditions opératoires du jour d'essai (température, humidité, opérateur...), les valeurs des paramètres impactant la mesure (débit de gaz, volume de matière, nombre de câbles...), bien évidemment les résultats des essais ainsi que leurs comparaisons avec les exigences des articles standards. Tous ces éléments doivent être enregistrés et sauvegardés dans une base de données. Cette base de données permettra de pouvoir comparer l'impact du changement des facteurs dans la fabrication (nouveaux procédés, nouveaux paramètres ou nouvelles matières premières).

En résumant, les attentes sont donc :

- Une feuille normalisée avec les résultats.
- Des informations sur l'échantillon d'essai.
- Des informations sur la date et l'opérateur de l'essai.
- Les résultats et les paramètres de mesures.
- La finalité des essais : conforme ou non conforme aux standards.

II. Choix du langage de programmation et outils à dispositions

II.1) Choix du langage de programmation

Le programme qui doit être conçu doit répondre aux besoins énumérés précédemment. L'utilisation doit être simple et accessible à tous. L'interface entre le programme et l'utilisateur doit offrir une utilisation instinctive et ne pas permettre à l'utilisateur de commettre des erreurs d'acquisition.

La programmation Visual Basic (VBA) sous Excel® a été le langage retenue. La facilité de la programmation et les interfaces simples entre l'utilisateur et le programme sont des atouts importants de VBA. De plus, l'utilisation d'Excel® est très répandue dans l'industrie, ceci offre un environnement familier aux utilisateurs.

II.2) Outils à dispositions

La programmation VBA est une programmation objet. Des lignes de codes commandent des instructions à appliquer aux objets qui peuvent êtres des classeurs, des feuilles ou des cellules... dans un environnement Excel®. Les outils d'interfaces mis à disposition sont généralement les « MessageBoxes » et les « Userforms ».

a) MessageBox

C'est une interface qui donne une indication à l'utilisateur ou lui demande de faire un choix. Les MessageBoxes se présentent sous forme de fenêtres et sont conditionnées sous Excel®. Différents types de MessageBoxes peuvent être choisis et les instructions à réaliser doivent être rédigées.

b) Userform

Les Userforms sont des interfaces à réaliser. Les Userforms attendent des informations de l'utilisateur pour lancer le programme.

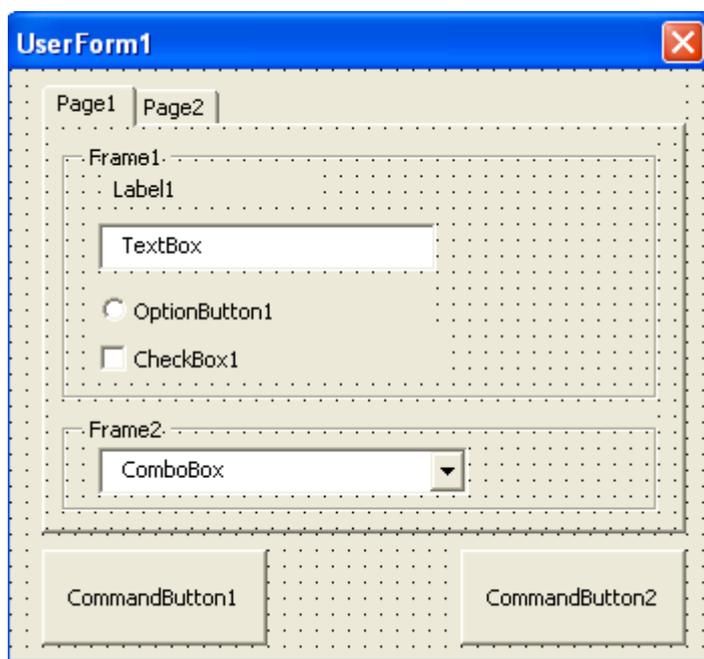


Figure 6.1 : Construction d'une Userform

Comme le montre la figure 6.1, une Userform est une fenêtre composée d'objets. Les Frames délimitent les emplacements, les Labels permettent d'écrire sur la fenêtre, les TextBoxs permettent à l'utilisateur de saisir une donnée (chiffres, lettres...), les OptionButtons permettent à l'utilisateur de faire un choix booléen (choix de OptionButton1 ou exclusif OptionButton2) et les CheckBox de faire un choix (choix de CheckBox1 ou CheckBox2 ou les deux). Les ComboBoxs sont utilisés pour faire un choix dans une liste. Les CommandButton utilisent des instructions pour lancer les macros.

III. Architecture du programme

III.1) Construction générale

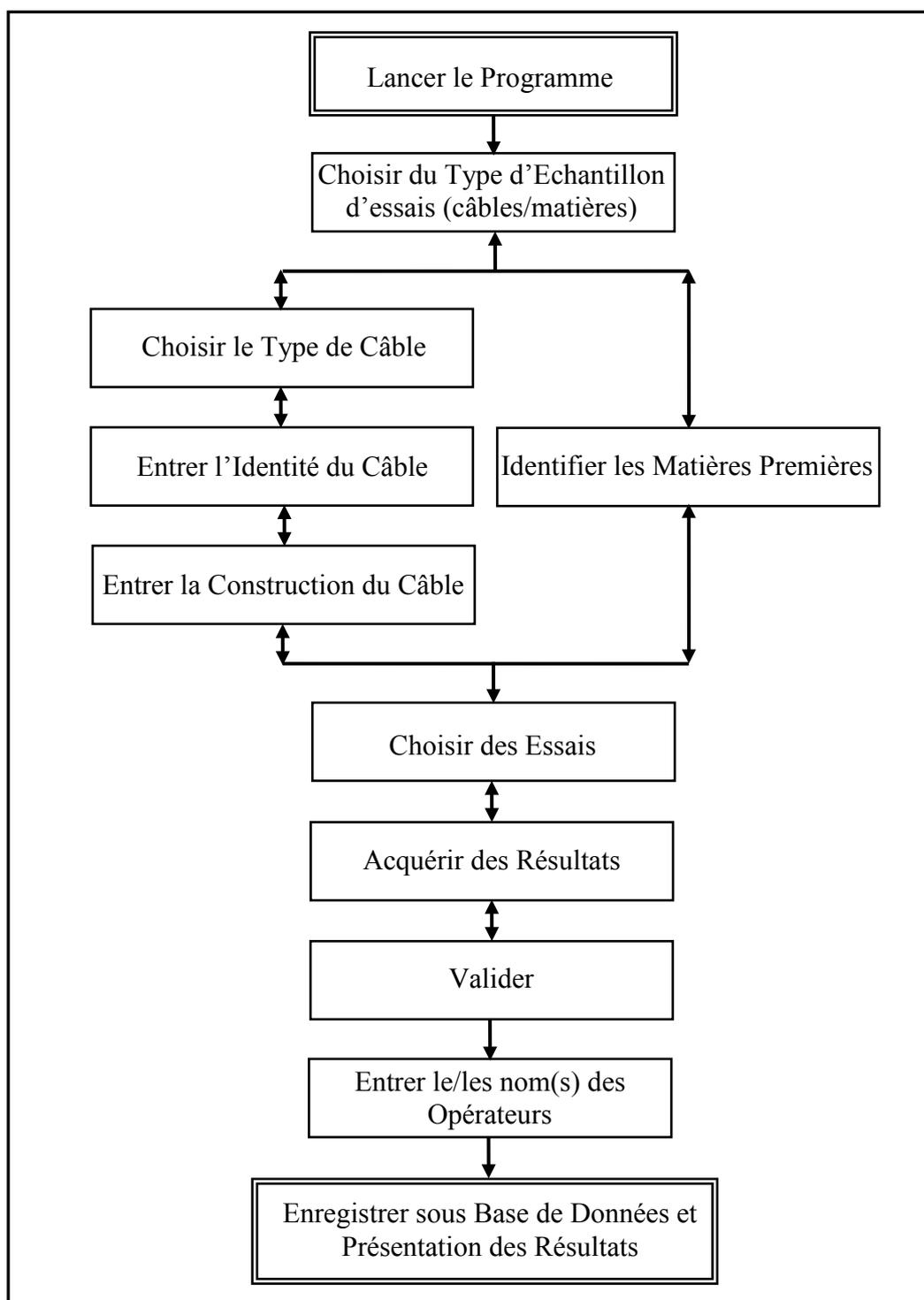


Figure 6.2 : Construction générale du programme VBA

La figure 6.2 montre la construction du programme VBA sous forme de diagramme. Une fois que l'utilisateur lance l'application une succession d'étapes s'offre à lui avant de générer la feuille de résultats. Comme le montre ce diagramme, avec les flèches à double sens, avant de valider sa saisie, l'utilisateur peut revenir aux étapes précédentes jusqu'à quitter le programme.

III.2) Mise en forme visuelle



Figure 6.3 : Présentation du Programme VBA

Comme la montre la capture d'écran en figure 6.3, le programme est dans un classeur Excel®. Pour une simple raison d'esthétique, des photographies ou images illustrent les essais sur cette page d'accueil. Le lancement du programme se fait par un clique sur la CommandButton placée entre les images.

IV. Lancer le programme

Pour lancer le programme, il faut que l'utilisateur clique sur la CommandButton illustrée en figure 7.3 et intitulée « Créer une nouvelle feuille de résultats ». Le clique lance l'instruction suivant :

Code 1 : Afficher une MessageBox et faire apparaître une Userform

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
    If MsgBox("Voulez-vous continuer?", vbYesNo + vbQuestion, "Créer une  
nouvelle feuille de résultats") = vbYes Then  
        UserForm1.Show  
    End If  
End Sub
```

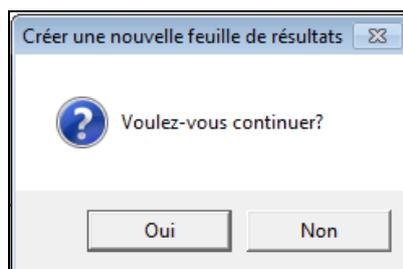


Figure 6.4 : MessageBox1 confirmation du lancement du programme

Comme le montre la figure 6.4, deux choix s'offrent à l'utilisateur, celui de continuer et saisir ses résultats ou alors d'annuler et revenir à la page d'accueil (figure 6.3).

Si l'utilisateur clique sur « Oui », d'après le Code 1 lié à la MessageBox, la Userform1 s'affiche. Si l'utilisateur choisit « Non », le programme s'arrête avec retour à la page d'accueil.

V. Choix du type d'échantillon, du type de câble et renseignements sur l'échantillon

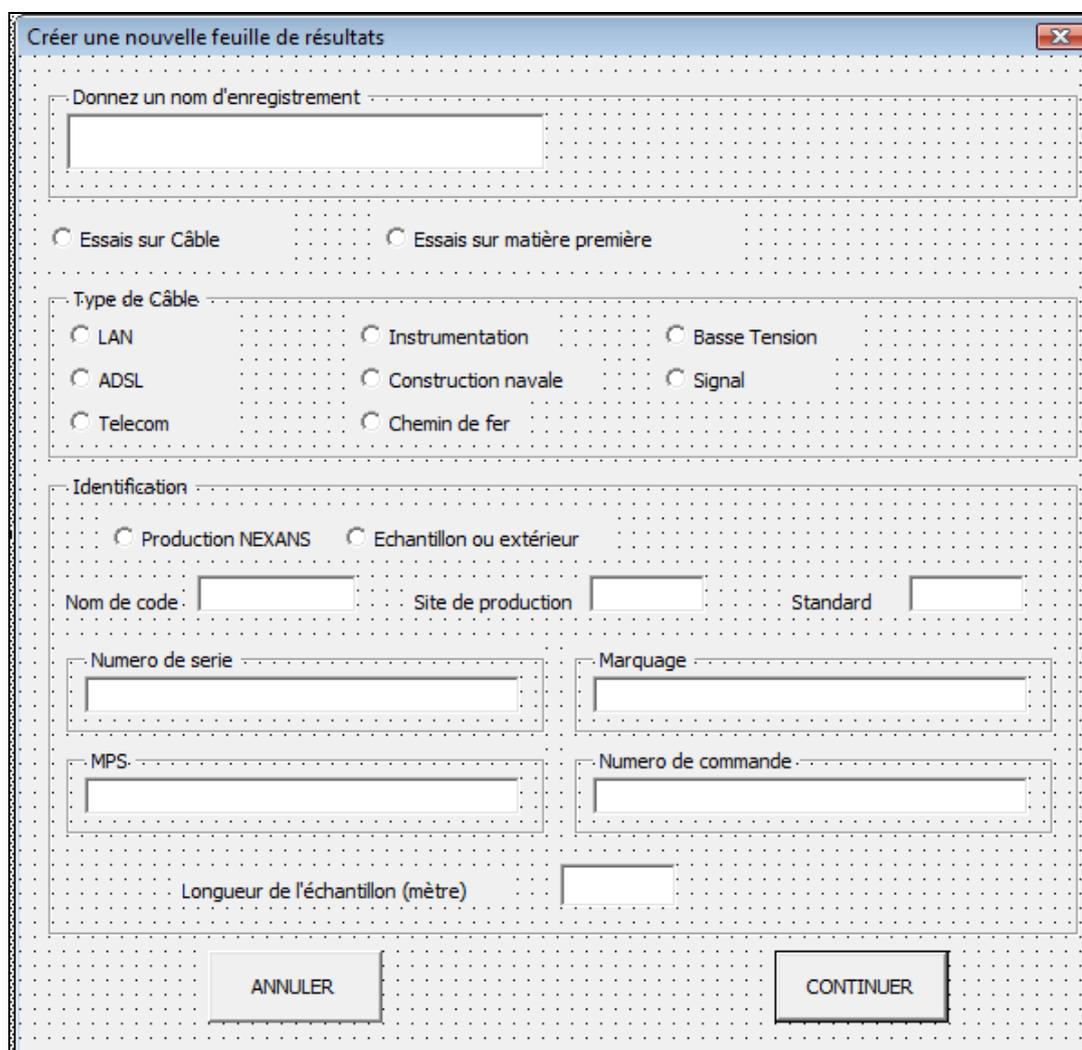


Figure 6.5 : Userform1 choix du type d'échantillon, de câble et identification

Comme le montre la figure 6.5, la première Userform permet dans un premier temps à l'utilisateur d'entrer un nom de dossier, de choisir le type d'échantillon (câble ou matière première), de choisir le type de câble parmi les huit possibilités (LAN, ADSL, Telecom...). Dans la partie basse de la Userform les renseignements liés à la production peuvent être entrés (nom du produit, n° de série, n° de commande...).

La Userform se simplifie suivant les choix de l'utilisateur :

- Si l'utilisateur choisit l'OptionButton « Essais sur câble », la Userform1 est comme sur la figure 6.5.
- Si l'utilisateur choisit l'OptionButton « Essais sur matières première », la Frame « Type de câble » disparaît ainsi que les TextBoxs liées aux informations pour les câbles. Certains labels changent, par exemple « Longueur d'échantillon » devient « Poids de l'échantillon »

Code 2 : Faire disparaître des éléments ou modifier leurs appellations sur une Userform

```
Private Sub OptionButton2_Click()
Me.Frame2.Visible = False 'Frame « type de câble » invisible
Me.Frame3.Caption = "Indentité de la matière première" 'Frame
initial : « identité du câble »
Me.Frame7.Caption = "N° de Batch" 'Frame initial : « Numéro de série »
Me.Frame5.Visible = False 'la Frame « Marquage » est invisible
Me.Frame6.Visible = False 'La Frame « MPS » est invisible
Me.Frame8.Visible = False 'La Frame : « Numéro de commande » est
invisible
TextBox9.Visible = False 'La TextBox pour le standard est invisible
Label3.Visible = False 'Le Label « standard » est invisible
Me.Label4.Caption = "Masse de l'échantillon (gr)" 'Label initial :
« longueur d'échantillon (mètre) »
Me.OptionButton12.Visible = False 'L'OptionButton « Produit à TUZLA »
est invisible
Me.OptionButton13.Visible = False 'L'OptionButton « Echantillon ou
extérieur » est invisible
UserForm5.MultiPage1(0).Visible = False 'L'essai de propagation de flamme
sera invisible
UserForm5.MultiPage1(1).Visible = False 'L'essai de densité des fumées
sera invisible
UserForm5.MultiPage1(3).Visible = False 'L'essai de propagation
d'incendie sera invisible
UserForm5.MultiPage1(4).Visible = False 'L'essai de résistance à
l'incendie sera invisible
End Sub
```

Le Code 2 montre comment rendre invisible les éléments lorsque l'utilisateur clique sur l'OptionButton2 « Essais sur matière première ». **Me.Frame** ou **Me.Label**, désigne la Frame ou le Label sur la Userform où se trouve l'OptionButton2. C'est la fonction **visible = False** qui est utilisée pour rendre invisible un objet. Dans le même esprit, lorsque l'utilisateur clique sur l'OptionButton1 « Essais sur câble » les éléments sont affichés avec la fonction **visible = True**. Pour modifier une appellation on utilise la propriété **Caption** de l'objet, par exemple **Me.Frame7.Caption = "N° de Batch"** fait apparaître « N° de batch » au niveau de la Frame7.

Un code permet de saisir uniquement des valeurs numériques, il est utile pour entrer la longueur de l'échantillon.

Code 3 : Imposer à une TextBox de ne contenir que des valeurs numériques

```
Private Sub TextBox10_Change()
If IsNumeric(Me.TextBox10.Text) = 0 Then
' Si la fonction IsNumeric() renvoi 0, cela signifie que TextBox.Text
n'est pas numérique
If Me.TextBox10.Text = "" Then
'Si textbox.text="" on fait rien
Else
'Sinon message d'erreur et effacement du contenu de la TextBox
MsgBox "Entrez une valeur numérique pour le diamètre du câble !"
Me.TextBox10.Text = ""
End If
End If
End Sub
```

Le Code 3 utilise la fonction **IsNumeric()** sur une TextBox. Grâce à ce code, la TextBox ne peut être que numérique ou vide. Ce Code est très utile lorsque l'utilisateur doit impérativement saisir des valeurs numériques utiles pour des calculs ou des

comparaisons. Il est très répandu dans la Userform5 qui fait intervenir les résultats d'essais.

Une fois tous les champs renseignés et les choix réalisés, l'utilisateur peut choisir de continuer. Le clique sur la CommandeButton2 « CONTINUER » lancera les instructions suivantes selon les choix réalisés sur la Userform1.

Code 4 : Faire disparaître la Userform1 et continuer le programme

```
Private Sub CommandButton2_Click()  
Me.Hide 'La Userform1 est caché mais sont contenue  
n'est pas effacé  
  
If OptionButton2 Then 'Les essais sur matière première sont choisis,  
UserForm5.Show la Userform5 pour essais apparaît.  
End If  
If OptionButton3 Then 'Le câble LAN est choisis, la Userform3  
UserForm3.Show apparaît.  
End If  
If OptionButton4 Then 'Le câble ADSL est choisi, la Userform4  
UserForm4.Show apparaît.  
End If  
If OptionButton5 Then 'Le câble Telecom est choisi, la Userform7  
UserForm7.Show apparaît.  
End If  
If OptionButton6 Then 'Le câble Instrumentation est choisi, la  
UserForm9.Show Userform9 apparaît.  
End If  
If OptionButton7 Then 'Le câble de construction navale est choisi,  
UserForm11.Show la Userform11 apparaît.  
End If  
If OptionButton8 Then 'Le câble pour chemin de fer est choisi, la  
UserForm10.Show Userform10 apparaît.  
End If  
If OptionButton9 Then 'Le câble Basse tension est choisi, la  
UserForm2.Show Userform2 apparaît.  
End If  
If OptionButton10 Then 'Le câble Signal est choisi, la Userform8  
UserForm8.Show apparaît.  
End If  
End Sub
```

L'instruction **Me.Hide** utilisée sert à cacher la Userform1 mais sans vider son contenu. Toutes les informations stockées seront utilisées tout au long du programme. Pour chaque type de câble il existe une Userform afin de renseigner sa construction. Si les essais ont été réalisés sur une matière première la Userform5 destinée aux résultats des essais apparaît.

Si l'utilisateur veut quitter le programme en cliquant sur « ANNULER », les instructions de la CommandeButton1 s'exécutent.

Code 5 : Faire disparaître la Userform1 et quitter le programme

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Me.Hide  
Unload Me  
End  
End Sub
```

Le Code 5 montre comment quitter le programme. L'instruction `Unload Me` vide toutes les données stockées dans la Userform. L'instruction `End` cache toutes les Userforms.

VI. Construction du câble (pour les essais sur câble)

VI.1) Câbles pour basses tensions

Comme il a été vu dans les précédents chapitres, les câbles possèdent des constructions très différentes suivant leurs applications. La construction d'un câble impacte les résultats des essais, il est donc important de le faire figurer sur la feuille de résultats. Les huit types de câbles aux choix, dans la Userform1 figure 6.4, permettent chacun d'accéder à une Userform pour définir la construction du câble.

The image shows a VBA Userform titled "Propriétés du câble basse tension". It is a complex form with multiple sections for defining cable properties. The sections include: "Conducteur" (Copper/Aluminum, Tension in Volt, Surface in mm², Mica band), "Type de conducteur" (Solid, Multiple, Compact, Flexible), "Groupe" (Single, Pair, Three, Four), "Construction du câble" (Insulation: PVC, PE, XLPE, HFFR, XL-HFFR, Autre; PET: Present, Groupe, Général, Groupe et Générale; Câble de téléreport: Present), "Ecran" (Present, Bandage copolymère/aluminium, Autre; Utilisation: Groupe, Générale, les deux), "Bourrage" (Present, PVC, PE, XLPE, HFFR, XL-HFFR, autre), "Gaine interne" (Present, PVC, PE, XLPE, HFFR, XL-HFFR, autre), "Armure" (Present, Tige acier, bande acier, Broderie acier, tige cuivre, bande cuivre, broderie cuivre), and "Gaine-externe" (PVC, PE, XLPE, HFFR, XL-HFFR, autre). At the bottom, there are fields for "Couleur du câble" and "Roids approximatif (kg/km)", and two buttons: "RETOUR" and "CHOIX DES ESSAIS".

Figure 6.6 : Userform2 pour la construction d'un câble basse tension

La figure 6.6 montre la Userform qui permet de définir le design de construction des câbles de basses tensions. De façon générale les Userforms pour la construction des câbles sont en deux parties : la première partie renseigne sur le conducteur et la seconde sur la construction générale. Pour les câbles à basse tension, l'utilisateur renseigne dans la première partie le type de conducteur (cuivre ou aluminium) et sa mise en forme (solide, flexible...). La section des conducteurs, leurs nombres ainsi que leurs groupements (seul, paire, tierce et quarte) sont des paramètres à renseigner. La présence ou non de bande de mica peut être choisie.

Pour guider l'utilisateur dans ses choix, les ComboBox sont pré-remplies par des données utilisées fréquemment sur le site de TUZLA, par exemple pour les tensions ou les sections des conducteurs des câbles les plus produits. Suivant les choix des éléments disparaissent au fur et à mesure.

Code 6 : Pré-remplir les objets d'une Userform

```
Private Sub UserForm_Initialize()  
ComboBox1.AddItem "0,50"  
ComboBox1.AddItem "0,75"  
ComboBox1.AddItem "1,0"  
ComboBox1.AddItem "1,5"  
ComboBox1.AddItem "2,5"  
ComboBox1.AddItem "4"  
ComboBox1.AddItem "10"  
ComboBox1.AddItem "16"  
ComboBox1.AddItem "25"  
  
↓  
ComboBox1.AddItem "800"  
ComboBox1.AddItem "1000"  
  
ComboBox2.AddItem "300/300"  
ComboBox2.AddItem "300/500"  
ComboBox2.AddItem "450/750"  
ComboBox2.AddItem "600/1000"  
  
OptionButton18.Visible = False  
OptionButton19.Visible = False  
OptionButton20.Visible = False  
  
↓  
OptionButton47.Visible = False  
  
TextBox5.Visible = False  
TextBox7.Visible = False  
TextBox8.Visible = False  
TextBox9.Visible = False  
TextBox10.Visible = False  
End Sub
```

Le code 6 permet d'initialiser le contenu des objets dans la Userform, comme on peut le voir, les ComboBox contiennent des valeurs pour les choix de tension et de surface. Initialement beaucoup d'OptionButtons sont invisibles, elles apparaissent en fonction des choix de l'utilisateur.

Code 7 : Modifier le contenu d'une Userform en fonction d'un choix

```
Private Sub ComboBox1_Change()  
If Me.ComboBox1.Value >= 10 Then  
Me.OptionButton5.Visible = True  
Else  
Me.OptionButton5.Visible = False  
End If  
End Sub
```

D'après le code 7, si la valeur de la ComboBox1 est supérieure ou égale à 10, cela veut dire que la section de l'âme est supérieure ou égale à 10 mm², donc d'après les normes internationales l'âme peut être toronnée et compactée, donc l'OptionButton5 qui rend possible ce choix est affichée, sinon elle est invisible.

Code 8 : Modifier le contenu d'une Userform en fonction d'un choix

```
Private Sub OptionButton8_Click()  
    If Me.OptionButton8 Then  
        Me.Frame6.Caption = "Nombre de paires"  
    End If  
End Sub
```

Le code 8 montre comment modifier l'intitulé d'une Frame en fonction d'un choix d'OptionButton. L'exemple illustre la saisie du nombre de conducteur en fonction du type de regroupement. Si les conducteurs sont regroupés par paire, la Frame sera intitulée « Nombre de paires », si ils sont regroupé par tierce, la Frame sera intitulée « Nombre de tierces ».

Dans la seconde partie de la Userform, l'utilisateur définit la construction du câble ainsi que les matériaux utilisés. En règle générale, les plastiques utilisés sont le PVC, le PE, le XLPE, le HFFR, le XL-HFFR. Au cas où un autre matériau est utilisé, l'utilisateur peut choisir « autre » et entrer le type de matériau dans une TextBox qui apparaît. Si un composant comme l'écran ou la gaine interne est coché alors la liste des choix s'affiche, sinon elle reste masquée.

Code 9 : Modifier le contenu d'une Userform en fonction d'un choix de CheckBox

```
Private Sub CheckBox4_Click()  
    If CheckBox4.Value = True Then  
        Me.OptionButton30.Visible = True 'Optionbutton bourrage PVC visible  
        Me.OptionButton31.Visible = True 'Optionbutton bourrage PE visible  
        Me.OptionButton32.Visible = True 'Optionbutton bourrage XLPE visible  
        Me.OptionButton33.Visible = True 'Optionbutton bourrage HFFR visible  
        Me.OptionButton34.Visible = True 'Optionbutton bourrage XLHFFR visible  
        Me.OptionButton35.Visible = True 'Optionbutton bourrage autre visible  
    Else  
        Me.OptionButton30.Visible = False 'Optionbutton bourrage PVC invisible  
        Me.OptionButton31.Visible = False 'Optionbutton bourrage PE invisible  
        Me.OptionButton32.Visible = False 'Optionbutton bourrage XLPE invisible  
        Me.OptionButton33.Visible = False 'Optionbutton bourrage HFFR invisible  
        Me.OptionButton34.Visible = False 'Optionbutton bourrage XLHFFR invisible  
        Me.OptionButton35.Visible = False 'Optionbutton bourrage autre invisible  
    End If  
End Sub
```

Comme pour les OptionButtons, les CheckBoxs sont des objets servant à choisir. Elles sont très utilisées lors de la construction des câbles, pour définir si un élément de construction est présent ou non, le cas échéant, les différents matériaux utilisables sont listés, sinon ils restent invisibles. Suivant le code 9, si l'utilisateur clique sur la CheckBox pour la sélectionner, les différentes OptionButton apparaissent et elles disparaissent si l'utilisateur enlève la sélection.

La Userform2 utilisée pour les câbles basses tensions ressemble de façon générale aux autres Userforms utilisées pour les autres types de câbles. Dans certains cas de câble, produit de façon intense, le programme contient directement les informations de construction des câbles, c'est le cas par exemple pour les câbles LAN.

VI.2) Câbles LAN Cat5 et Cat6

Si l'utilisateur choisie des essais sur câbles LAN, la Userform3 suivante apparaît :

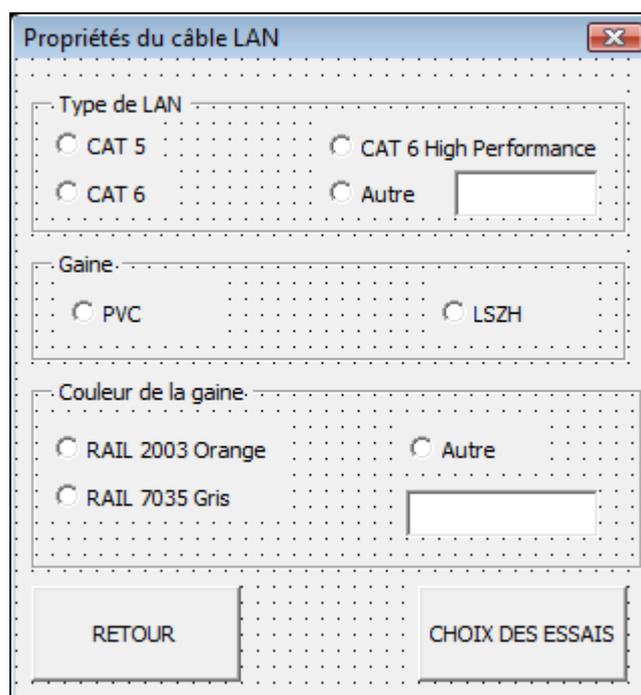


Figure 6.7 : Userform3 pour le choix du type de câble LAN

Comme le montre la figure 6.7, la Userform3 pour le choix du type de LAN est très simple. Comme ces câbles sont produits en grande quantité, leurs caractéristiques et leurs constructions sont bien connues, les simples choix dans cette Userform suffisent à renseigner entièrement les caractéristiques. L'utilisateur a le choix entre la CAT5, CAT6 et CAT6 H.P., la gaine est soit en PVC soit en LSZH et les couleurs principales sont le gris et l'orange. Une fois que l'utilisateur a réalisé sa sélection, les informations nécessaires sont stockées dans le programme et seront utilisé ensuite.

Si le type de LAN est différent ou provient d'un autre site de production, l'utilisateur peut choisir l'OptionButton « Autre ». Une Userform qui ressemble à la Userform2 en figure 6.6 apparaît.

Une fois que la construction du câble est finie, l'utilisateur peut cliquer sur « CHOIX DES ESSAIS » pour choisir les essais ou bien cliquer sur « RETOUR » pour revenir à la Userform précédente.

Code 10 : Instruction de la CommandeButton pour le choix des essais

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
    UserForm2.Hide 'la Userform est cachée avec les informations en mémoire  
    UserForm5.Show 'la Userform5 pour les essais apparaît  
End Sub
```

Code 11 : Instruction de la CommandeButton pour le retour vers la Userform1

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
    Unload Me 'la Userform est vidée des informations et disparaît  
    UserForm1.Show 'la Userform1 apparaît  
End Sub
```

VII. Choix des essais et saisie des résultats

Comme le montre le Code 2, suivant que l'échantillon défini dans la Userform1, en figure 6.5, est un câble ou une matière première, la Userform5 pour la saisie des résultats est différente.

VII.1) Essais sur câble

Cette Userform se présente sous forme de « Multipage ». Chaque « page » est réservée à un essai et **tous les essais sont présentés** :

- Propagation de flamme
- Densité de fumées
- %HCl, pH et conductivité
- Propagation d'incendie
- Résistance aux incendies
- Oxygene Index

Sur chaque page, l'utilisateur peut choisir si l'essai est réalisé ou non.

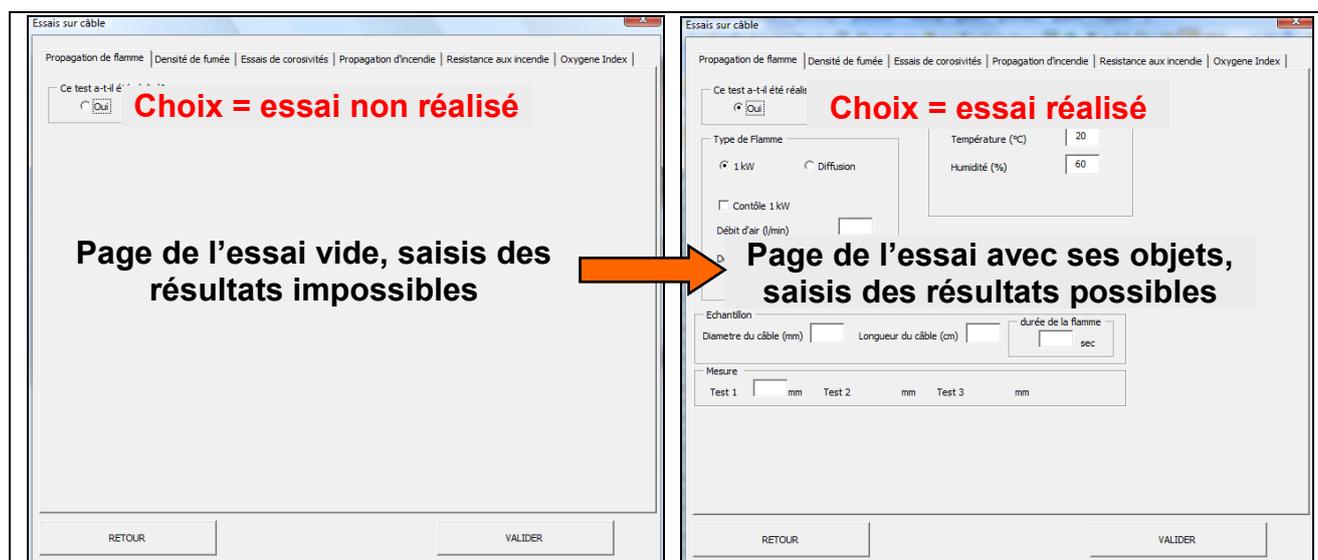


Figure 6.8 : la Userform5 se modifie suivant un choix

Comme le montre la capture d'écran en figure 6.8, si l'utilisateur répond « Oui » à la question « Ce test a-t-il été réalisé ? » alors l'utilisateur peut saisir ses résultats. Les codes utilisés sont semblables aux codes 3 et 7.

Pour chaque test, l'utilisateur doit saisir les propriétés de l'échantillon, la date de l'essai, les conditions opératoires et les résultats. A partir de ces données le programme génère des calculs et des comparaisons avec les exigences des standards. Chaque test a aussi ses particularités, par exemple l'essai de mesure de densité des fumées génère des datas, il est possible d'incorporer ces datas sur la feuille de résultats.

a) Essais de propagation de flamme IEC 60332

The screenshot shows a software window titled "Essais sur câble" with a tabbed interface. The active tab is "Propagation de flamme". Other tabs include "Densité de fumée", "Essais de corosivités", "Propagation d'incendie", "Resistance aux incendie", and "Oxygene Index".

The "Propagation de flamme" section contains:

- A group box "Ce test a-t-il été réalisé?" with radio buttons for "Oui" (selected) and "Non".
- A group box "Conditions du laboratoire" with input fields for "Date de l'essai" (format: jj/mm/aaaa), "Température (°C)" (value: 20), and "Humidité (%)" (value: 60).
- A group box "Type de Flamme" with radio buttons for "1 kW" (selected) and "Diffusion". Below it is a checkbox "Contrôle 1 kW".
- Input fields for "Débit d'air (l/min)" and "Débit Prop (ml/min)".
- A group box "Echantillon" with input fields for "Diamètre du câble (mm)", "Longueur du câble (cm)", and "durée de la flamme" (value: [] sec).
- A group box "Mesure" with input fields for "Test 1" (value: [] mm), "Test 2" (value: [] mm), and "Test 3" (value: [] mm).

At the bottom of the window are two buttons: "RETOUR" and "VALIDER".

Figure 6.9 : Essai de propagation de flamme sur la Page1 de la Userform5

Comme le montre la figure 6.9, l'utilisateur du programme doit dans un premier temps renseigner la Frame « Conditions du laboratoire », c'est à dire la date de l'essai, la température et l'humidité du laboratoire. Ces deux dernières données sont importantes car elles doivent être en accord avec les valeurs exigées par le standard.

Dans un second temps, l'utilisateur doit choisir le type de flamme, directement lié aux standards d'essais IEC 60332-1 (flamme de 1 kW) et IEC 60332-2 (diffusion) détaillés dans le chapitre 4 en V. V.1). Pour la flamme de 1 kW un contrôle doit être effectué, le cas échéant, l'utilisateur sélectionne la CheckBox correspondante, les Labels deviennent alors « Débit d'air contrôlé » et « Débit Prop contrôlé ». Si la flamme de diffusion est choisie le Label du débit d'air ainsi que sa TextBox disparaissent et un autre Label avec une autre TextBox apparaissent pour renseigner la taille de la flamme.

Dans un troisième temps, l'utilisateur doit renseigner l'échantillon testé. Pour ce test, le diamètre, la longueur de l'échantillon et la durée d'exposition de la flamme sont les paramètres clés.

Enfin pour finir, l'utilisateur rentre ses mesures. Dans un souci de répétabilité, 3 tests sont envisagés pour cet essai. Si seulement un test est réalisé, les TextBoxes des tests 2 et 3 restent invisibles.

Le Code 3 est important dans ce cas, car il oblige l'utilisateur à rentrer des valeurs numériques. A ce stade une erreur de saisi peut faire planter le programme, donc toutes les TextBox à vocation numérique utilisent le Code 3.

Code 12 : Calcule de moyenne pour la propagation de flamme

```
'Définition des valeurs des mesures à partir des résultats dans les TextBoxs
If UserForm5.TextBox23.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox23.Value) Then
    Test1 = UserForm5.TextBox23.Value
End If
If UserForm5.TextBox24.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox24.Value) Then
    Test2 = UserForm5.TextBox24.Value
End If
If UserForm5.TextBox25.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox25.Value) Then
    Test3 = UserForm5.TextBox25.Value
End If
'Si il n'y a qu'une mesure
If Test2 = 0 And Test3 = 0 Then
    ActiveCell.Offset(5, 7).FormulaR1C1 = "Résultat"
    ActiveCell.Offset(5, 7).Font.Bold = True
    ActiveCell.Offset(6, 7).Value = Test1
    ActiveCell.Offset(6, 7).Font.Bold = True
End If
'Si il y a deux mesures calcule de moyenne
If Test2 <> 0 And Test3 = 0 Then
    ActiveCell.Offset(5, 7).FormulaR1C1 = "Moyenne"
    ActiveCell.Offset(5, 7).Font.Bold = True
    ActiveCell.Offset(6, 7).Value=Round(Application.WorksheetFunction.Average(Test1,
    Test2), 0)
    ActiveCell.Offset(6, 7).Font.Bold = True
End If
'Si il y a trois mesures calcule de moyenne
If Test2 <> 0 And Test3 <> 0 Then
    ActiveCell.Offset(5, 7).FormulaR1C1 = "Moyenne"
    ActiveCell.Offset(5, 7).Font.Bold = True
    ActiveCell.Offset(6, 7).Value=Round(Application.WorksheetFunction.Average(Test1,
    Test2, Test3), 0)
    ActiveCell.Offset(6, 7).Font.Bold = True
End If
```

Le Code 12 permet de faire calculer une moyenne simple des mesures si elles sont plusieurs. Même si le calcul est simple, ce code évite des erreurs d'opération et de chiffres significatifs. La fonction `Application.WorksheetFunction.Average(Test1, Test2, Test3)` calcule la moyenne des trois mesures et la fonction `Round(number, 0)` arrondit à l'entier près (`Round(number, 1)` arrondit au dixième près...). Le standard demande des valeurs au millimètre près, il est donc inutile d'avoir des chiffres décimaux.

Les exigences des standards sont définies dans le chapitre 4 page 65. Pour être conforme l'échantillon doit mesurer entre 575 et 625 mm, il doit être soumis à la flamme pendant une durée fonction de son diamètre, et en fin de test, il doit avoir une mesure de partie non-carbonisée supérieure à 50 mm. Ces informations relatives à l'article standard sont introduites dans le programme afin de comparer les résultats de l'essai.

b) Mesure de densité de fumées IEC 61034

The screenshot shows a VBA Userform titled "Essais sur câble" with a tabbed interface. The active tab is "Densité de fumée". The form is divided into several sections:

- Navigation:** Tabs for "Propagation de flamme", "Densité de fumée", "Essais de corosivités", "Propagation d'incendie", "Resistance aux incendie", and "Oxygene Index".
- Test Status:** A section titled "Ce test a-t-il été réalisé?" with radio buttons for "Oui" (selected) and "Non".
- Conditions opératoires:** A section containing:
 - Inputs for "Diametre du câble (mm)" (45), "Longueur du câble (mm)" (100), and "nombre de câbles" (1).
 - A "Dernier essai de qualification" input field with the value "jj/mm/aaaa".
 - A "Conditions du laboratoire" section with inputs for "Date de l'essai" (jj/mm/aaaa), "Température (°C)" (20), and "Humidité (%)" (50).
- Résultats:** A section with three columns of data entry:
 - Transmission (%):** Test 1, Test 2, Test 3.
 - Parametre Ao (m²):** Test 1, Test 2, Test 3.
 - Durée du point minimum (sec):** Durée 1, Durée 2, Durée 3.
- Data:** A section with a checked "Oui" checkbox, an empty text input field, and a "Parcourir" button.
- Buttons:** "RETOUR" and "VALIDER" buttons at the bottom.

Figure 6.10 : Essai de densité de fumée sur la Page2 de la Userform5

La figure 6.10 montre la page que doit remplir l'utilisateur pour l'essai de densité de fumée. Comme pour l'essai de propagation de flamme, les conditions du laboratoire et les propriétés de l'échantillon doivent être renseignées. Pour juger la qualité de l'installation et la fiabilité de l'essai, la cabine subit périodiquement un essai de qualification, la date de cet essai peut être inscrite sur la feuille de résultat.

Lors de l'essai, la mesure principale est la transmission de lumière (%), c'est la valeur de cette mesure qui définit la conformité au standard. Le paramètre Ao (m²) est calculé à partir de la transmission de lumière et la durée au minimum de transmission est une simple mesure indicative. Les codes utilisés pour le calcul de la moyenne sont semblables à celui utilisé pour l'essai de propagation de flamme. Les mesures de densité de fumées sont parfois dispersées sur des essais réalisés le même jour avec le même échantillon, cette observation illustre la nécessité de renseigner la dispersion des valeurs.

Code 13 : Calcul de moyenne et détermination de la dispersion des valeurs

```
'Calcul de la moyenne moy2 avec TrTest1, TrTest2 et TrTest3
moy2 = Application.WorksheetFunction.Average(TrTest1, TrTest2, TrTest3)
'Définition des valeurs éloignées de ±5% de la moyenne
moy2less = moy2 - moy2 * 0.05
moy2more = moy2 + moy2 * 0.05
'Condition Si les valeurs TrTest1, TrTest2 et TrTest3 sont comprises entre + et
- 5% de la moyenne
If moy2less < TrTest1 And moy2less < TrTest2 And moy2less < TrTest3 And
moy2more > TrTest1 And moy2more > TrTest2 And moy2more > TrTest3 Then
    ActiveCell.Offset(4, 5).FormulaR1C1 = "Moyenne"
    ActiveCell.Offset(4, 5).Font.Bold = True
    ActiveCell.Offset(4, 6).FormulaR1C1 = "(" & Round(moy2, 0) & "±5%"
    ActiveCell.Offset(4, 6).Font.Bold = True
    ActiveWorkbook.Names.Add Name:="SmokeResult",
    RefersToR1C1:=ActiveCell.Offset(4, 6)
Else
    ActiveCell.Offset(3, 5).FormulaR1C1 = "Les valeurs sont dispersées"
    ActiveCell.Offset(3, 5).Font.Bold = True
    ActiveCell.Offset(4, 6).FormulaR1C1 = "Moyenne =" & Round(moy2, 0) & "%"
    ActiveCell.Offset(4, 6).Font.Bold = True
    ActiveWorkbook.Names.Add Name:="SmokeResult",
    RefersToR1C1:=ActiveCell.Offset(4, 6)
End If
```

La particularité de ce test est la possibilité de récupérer de datas. Les mesures sont enregistrées au format .dat. La forme générale est la suivante :

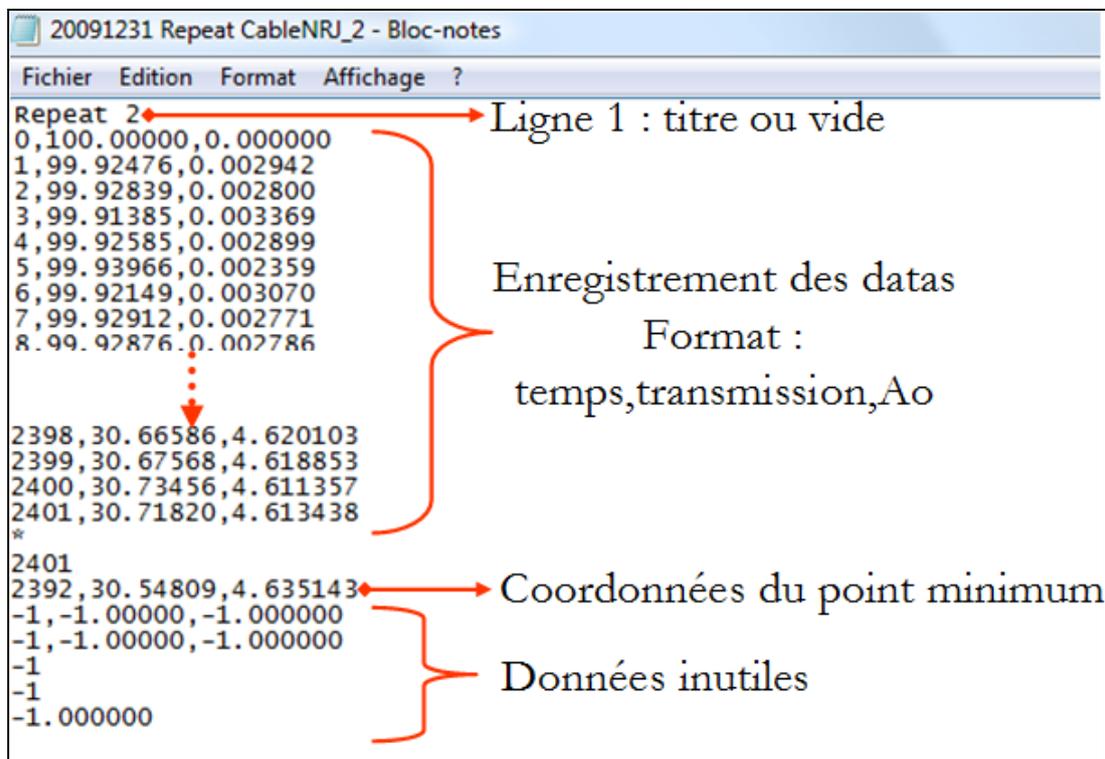


Figure 6.11 : Fichier contenant l'enregistrement des mesures de l'essai de densité de fumées

La figure 6.11 montre les datas de l'essai de densité de fumées. L'enregistrement commence à la ligne 2. Si l'essai va à son terme, les datas sont enregistrées pendant 2 401 secondes. Pour incruster les datas à la feuille de résultat il faut entrer l'adresse dans la TextBox située dans la Frame « Data » ou la sélectionner grâce au bouton parcourir.

Code 14 : Sélectionner un fichier à l'aide d'une fenêtre FileDialog

```
Private Sub CommandButton3_Click()  
Dim fd As FileDialog  
Set fd = Application.FileDialog(msoFileDialogFilePicker)  
With fd  
    .AllowMultiSelect = False  
    'Annule la selection multiple  
    .Filters.Clear  
    'Efface les formats de fichier  
    .Filters.Add "Fichiers DATA", "*.htm;*.html;*.dat;*.DAT;*.txt;*.TXT"  
    'Affiche seulement les fichiers aux formats spécifiés  
    If .Show = -1 Then  
        chemindata = .SelectedItems(1)  
    'Place le chemin du fichier dans la variable "chemindata"  
    End If  
End With  
  
UserForm5.TextBox127.Text = chemindata  
'Ecrit l'adresse des datas dans la TextBox  
  
End Sub
```

Le code 14 se lance lorsque l'utilisateur clique sur la CommandButton3 « Parcourir ». Il permet de sélectionner le fichier de data.

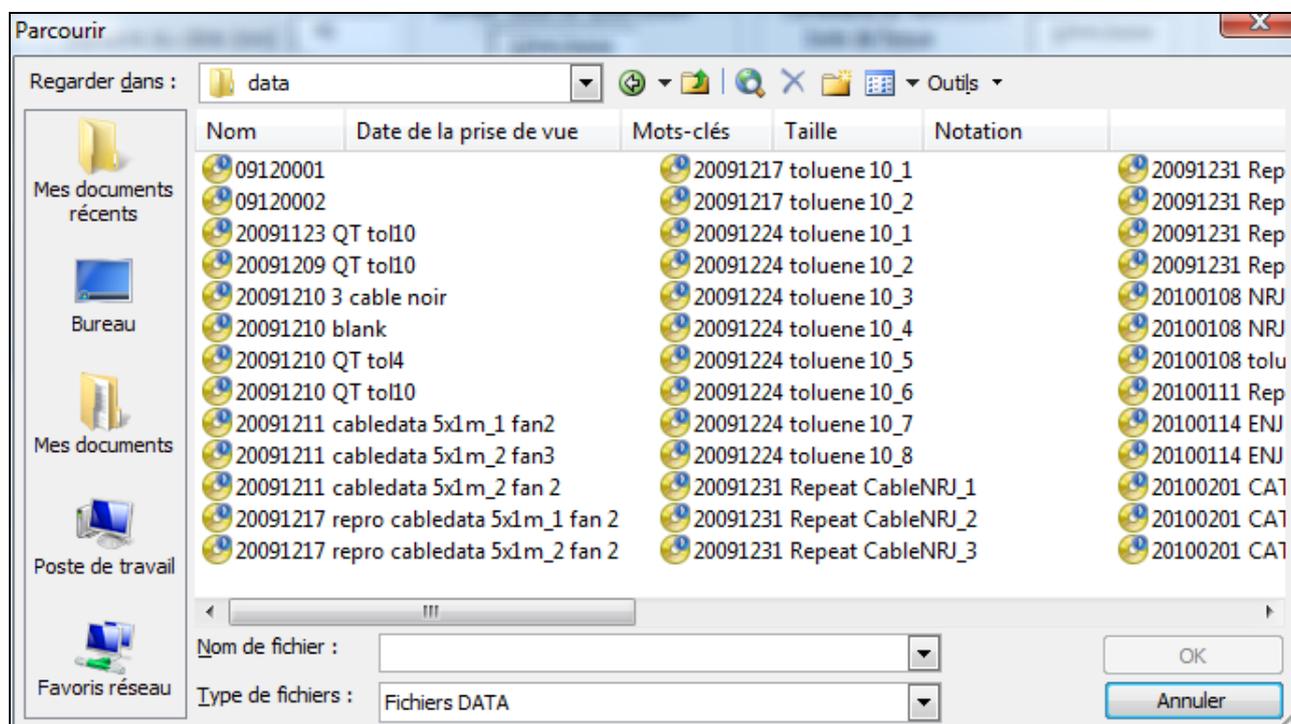


Figure 6.12 : FileDialog pour sélection d'un fichier data

La capture d'écran en figure 6.12 montre la fenêtre qui sert à sélectionner le fichier data. Une fois le fichier choisi, l'adresse de son emplacement apparaît dans la TextBox à gauche de la CommandButton3 « Parcourir ».

Code 15 : Code pour ajouter les datas sur une feuille Excel®

```
Sub AddSmokeData ()
'Condition pour ajouter les données : il faut que la TextBox contienne l'adresse
If UserForm5.TextBox127.Text <> "" Then
  Sheets(2).Activate 'si la TextBox n'est pas vide alors la page 2 est activée
  With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:="TEXT;" &
UserForm5.TextBox127.Text, Destination:=Range("A1"))
    .Name = UserForm1.TextBox1.Text
    .FieldNames = True
    .RowNumbers = False
    .FillAdjacentFormulas = False
    .PreserveFormatting = True
    .RefreshOnFileOpen = False
    .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
    .SavePassword = False
    .SaveData = True
    .AdjustColumnWidth = True
    .RefreshPeriod = 0
    .TextFilePromptOnRefresh = False
    .TextFilePlatform = 857
    .TextFileStartRow = 1
    .TextFileParseType = xlDelimited
    .TextFileTextQualifier = xlTextQualifierDoubleQuote
    .TextFileConsecutiveDelimiter = False
    .TextFileTabDelimiter = False
    .TextFileSemicolonDelimiter = False
    .TextFileCommaDelimiter = False
    .TextFileSpaceDelimiter = False
    .TextFileOtherDelimiter = "," 'séparateur des données
    .TextFileColumnDataTypes = Array(1, 1, 1)
    .TextFileDecimalSeparator = "." 'Séparateur des décimales
    .TextFileTrailingMinusNumbers = True
    .Refresh BackgroundQuery:=False
  End With

  Sheets(2).Select
  Sheets(2).Name = "SMOKE DATA" 'Nomme la page 2
  Call Traitement 'instruction pour traiter les données
End If
End Sub
```

Le code 12 est obtenu par un enregistrement automatique d'une macro lors de l'ajout des datas. Comme les datas sont toujours au même format, seule leurs adresse varient, il suffit donc de remplacer dans le code l'adresse enregistrée par celle qui sera utilisée. Dans notre cas, l'adresse du fichier data est stockée dans la TextBox127 de la Userform5, soit `UserForm5.TextBox127.Text`, il faut juste faire apparaître ce point dans le code. Les autres points importants sont le séparateur de données qui est « , » et le séparateur des décimales qui est « . ». Après cette première instruction qui ajoute les données brutes sur la page Excel®, elles doivent être traitées, le code appelle la macro « Traitement » pour la mise en forme les données.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Repeat 2						
2	0	100	0				
3	1	99.94997	0.001956				
4	2	99.97006	0.001171				
5	3	99.94011	0.002341				
6	4	99.96458	0.001385				
7	5	99.95289	0.001842				
8	6	99.93427	0.00257				
9	7	99.96494	0.00137				
10	8	100	0				
11	9	99.95509	0.001756				
12	10	99.95435	0.001785				
13	11	99.9277	0.002827				

Figure 6.13 : Feuille Excel avec les datas

La figure 6.13 montre les données avant qu'elles soient traitées par la macro de traitement des datas.

Code 16 : Traitement des datas

```

Sub Traitement()
'Sélection de la page 2
Sheets(2).Select
'Sélection de la cellule A1
Cells(1, 1).Select
'Sélection de la cellule avec « 0 » dans la colonne A
Do While Not ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
'Sa cellule avec « 0 » est nommé « StartData »
ActiveWorkbook.Names.Add Name:="StartData", RefersToR1C1:=ActiveCell
'Sélection de la ligne de la cellule active
Rows(ActiveCell.Row).Select
'Ajout d'une ligne
Selection.Insert Shift:=xlDown
'Sélection de la cellule « StartData »
Range("StartData").Select
'Ecriture en tête de la colonne A « Time (sec) »
ActiveCell.Offset(-1, 0).FormulaR1C1 = "Time(sec)"
'Le nom de la cellule en tête de la colonne A est « TitleTime »
ActiveWorkbook.Names.Add Name:="TitleTime", RefersToR1C1:=ActiveCell.Offset(-1, 0)
'Ecriture en tête de la colonne B « Trans % »
ActiveCell.Offset(-1, 1).FormulaR1C1 = "Trans(%)"
'Le nom de la cellule en tête de la colonne B est « TitleTrans »
ActiveWorkbook.Names.Add Name:="TitleTrans", RefersToR1C1:=ActiveCell.Offset(-1, 1)
'Ecriture en tête de la colonne C « Ao »
ActiveCell.Offset(-1, 2).FormulaR1C1 = "Ao(m²)"
'Le nom de la cellule en tête de la colonne C est « TitleAo »
ActiveWorkbook.Names.Add Name:="TitleAo", RefersToR1C1:=ActiveCell.Offset(-1, 2)
'Sélection de la première ligne de la colonne C
Selection.End(xlToRight).Select
'Le nom de cette cellule est « EndDataRight »
ActiveWorkbook.Names.Add Name:="EndDataRight", RefersToR1C1:=ActiveCell
'Sélection de la dernière données enregistrées de la colonne C
Selection.End(xlDown).Select
'Le nom de cette cellule est « EndDataBottom »
ActiveWorkbook.Names.Add Name:="EndDataBottom", RefersToR1C1:=ActiveCell

```

```
'Traitement du point minimum
Range("EndDataBottom").Select
'Les coordonnées du point minimum sont toujours placées 3 cases en bas et 2
cases à gauche de la cellule « EndDataBottom »
ActiveCell.Offset(3, -2).Select
'Les trois valeurs sont copiées et collées en haut de la feuille
Selection.Copy
Cells(4, 5).Select
ActiveSheet.Paste
Range("EndDataBottom").Select
ActiveCell.Offset(3, -1).Select
Selection.Copy
Cells(4, 6).Select
ActiveSheet.Paste
Range("EndDataBottom").Select
ActiveCell.Offset(3, 0).Select
Selection.Copy
Cells(4, 7).Select
ActiveSheet.Paste
'La légende et le titre du tableau sont écrites
Cells(3, 5).FormulaR1C1 = "Time(%)"
Cells(3, 6).FormulaR1C1 = "Trans(%)"
Cells(3, 7).FormulaR1C1 = "Ao(m2)"
Cells(2, 5).FormulaR1C1 = "Minimum Transmission Point"
Call SetupData 'Appel la macro pour mettre en forme la page
Call GraphiqueAdd 'Appel la macro pour tracer le graphique
End Sub
```

Le code 16 traite les données de façon à intituler les colonnes et délimiter les données enregistrées. Comme il est montré sur la figure 6.11 et 6.13, l'enregistrement des datas commence toujours par « 0 » dans la colonne « A », parfois il y a un titre en cellule A1 et parfois elle est vide (dépend des manipulations le jour de l'essai). Pour avoir le début de l'enregistrement, le plus simple est de se placer sur la colonne A et de chercher la cellule qui a la valeur « 0 », cette cellule désigne le début de l'enregistrement avec $t = 0$ seconde. Une fois que cette cellule est trouvée, elle est nommée « StartData ». Une ligne est ajoutée pour mettre une légende sur chaque colonne pour renseigner la colonne du temps, de la transmission de lumière et du paramètre A_0 . Les cellules sont remplies et nommées. Le second point qui délimite les datas est la première valeur du paramètre A_0 , cette cellule est sélectionnée et nommée « EndDataRight ». La dernière cellule utile pour encadrer les datas et la dernière valeur du paramètre A_0 , cette cellule est sélectionnée et nommée « EndDataBottom ». Avec ces trois points il est possible d'encadrer toutes les datas dans un rectangle. On peut noter que sous Excel® les deux points de la diagonale suffisent pour encadrer la zone d'un rectangle.

La valeur critique de cet essai est donnée par le point de transmission minimum. Ce point se trouve tout en bas de la feuille. La deuxième partie de la macro copie les valeurs et les colle en haut de la feuille. Avant de terminer, la macro « SetupData » est lancée, elle met sous forme de tableau les coordonnées du point minimum. La macro « GraphiqueAdd » trace les courbes à partir des datas.

Repeat	Time(sec)	Trans(%)	Ao(m2)
1	0	100	0
2	1	99,94997	0,001956
3	2	99,97006	0,001171
4	3	99,94011	0,002341
5	4	99,96458	0,001385
6	5	99,95289	0,001842
7	6	99,93427	0,00257
8	7	99,96494	0,00137
9	8	100	0
10	9	99,95509	0,001756
11	10	99,95435	0,001785

Minimum Transmission Point		
Time(%)	Trans(%)	Ao(m2)
2401	30,79	4,60

Figure 6.14 : datas mises en forme

La figure 6.14 montre le résultat de la mise en forme des datas brutes. Faire apparaître les coordonnées du point minimum permet d'obtenir l'information plus vite. La délimitation des datas est utile pour tracer le graphique.

Code 17 : Ajouter un graphique à partir des datas

```

Sub GraphiqueAdd()
'La feuille 2 est sélectionnée
  Sheets(2).Select
'La zone des données est sélectionnée
  Range(Range("StartData").Offset(-1, 0), Range("EndDataBottom")).Select
  Charts.Add
  ActiveChart.ChartType = xlXYScatterSmoothNoMarkers
  ActiveChart.SetSourceData Source:=Sheets("SMOKE
DATA").Range(Range("StartData").Offset(-1, 0), Range("EndDataBottom")), PlotBy _
:=xlColumns
'Graphique sur une nouvelle page
  ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet
  With ActiveChart
    .HasTitle = True
'Titre du graphique
    .ChartTitle.Characters.Text = _
      "Measurement of Smoke Density During Cables Combustions"
    .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
'Le temps est l'axe des abscisses
    .Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "Time (sec)"
    .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
'La transmission de lumière est l'ordonnée principale
    .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "Transmission (%)"
  End With
'La feuille du graphique est nommée « SMOKE CHART »
  ActiveSheet.Name = "SMOKE CHART"
  ActiveChart.SeriesCollection(2).Select
  With Selection.Border
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlAutomatic
  End With
  With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = xlNone
    .MarkerForegroundColorIndex = xlNone
    .MarkerStyle = xlNone
    .Smooth = True
    .MarkerSize = 3
    .Shadow = False
  End With

```

```
ActiveChart.SeriesCollection(2).AxisGroup = 2
ActiveChart.PlotArea.Select
With ActiveChart
    .Axes(xlValue, xlSecondary).HasTitle = True
    'Le paramètre Ao est l'ordonnée secondaire
    .Axes(xlValue, xlSecondary).AxisTitle.Characters.Text = "Ao Parameter
(smoke's m2 by cable's meter)"
End With
End Sub
```

Le code 17 ajoute donc un graphique à partir des datas. Ce code est simple grâce à la délimitation précise des données sur la feuille Excel®. Le graphique obtenu est celui observé à plusieurs reprises dans le chapitre 4 page 54 et chapitre 5 pages 81 et 88.

Les exigences du standard sont définies dans le chapitre 4 page 68. Pour être conforme, l'échantillon doit être composé du nombre de tronçons de câble défini par le tableau 4.2 dans le chapitre 4. La mesure du minimum de transmission de lumière doit être supérieure à 60%. Ces informations relatives au standard sont introduites dans le programme afin de comparer les résultats des essais.

c) Essais de corrosivités : mesures de %HCl, pH et conductivité

The screenshot shows a user form titled 'Essais sur câble' with a tabbed interface. The 'Essais de corrosivités' tab is active. The form contains several sections:

- Propagation de flamme**, **Densité de fumée**, **Essais de corrosivités** (selected), **Propagation d'incendie**, **Resistance aux incendie**, **Oxygene Index**
- Ce test a-t-il été réalisé?** with radio buttons for 'Oui' and 'Non'.
- Conditions du laboratoire** with input fields for 'Date de l'essai', 'Température (°C)', and 'Humidité (%)'. There are also checkboxes for '% HCl réalisé' and 'pH et Conductivité réalisés'.
- Poids sur 1 metre** with input fields for 'Gaine Ext (g/m)', 'Gaine Int (g/m)', 'Isolant (g/m)', and 'Bourrage (g/m)'.
- Test du pourcentage de HCL** with checkboxes for 'Gaine ext.', 'Gaine Int.', 'Isolant', and 'Bourrage', each followed by 'échantillon' and an input field for 'mg'.
- Mesure du % HCl** with input fields for 'Gaine ext.', 'Gaine Int.', 'Isolant', and 'Bourrage'.
- Mesure du pH et de la conductivité** with checkboxes for 'Gaine ext.', 'Gaine int.', 'Isolant', and 'Bourrage', each followed by 'échantillon (mg)' and an input field.
- Mesure de conductivité** with input fields for 'Gaine ext.', 'Gaine int.', 'Isolant', and 'Bourrage'.
- Mesure de pH** with input fields for 'Gaine ext.', 'Gaine int.', 'Isolant', and 'Bourrage'.
- Buttons for 'RETOUR' and 'VALIDER' at the bottom.

Figure 6.15 : Page3 de la Userform5 pour les essais de corrosivités

La capture d'écran en figure 6.15 illustre la partie à compléter par l'utilisateur. Comme pour tous les autres tests, la Page3 se simplifie en fonction des choix, sur cette figure 6.15 il apparaît l'intégralité des objets présentables.

La particularité est que ce test comporte deux parties : le dosage du pourcentage d'HCl et la mesure de conductivité d'une solution de barbotage des fumées. L'utilisateur peut avoir réalisé les deux parties ou seulement une seule.

Les essais peuvent être réalisés sur chaque partie du câble, à savoir : la gaine externe, la gaine interne, l'isolant et le bourrage. Pour répondre au standard énoncé dans le chapitre 4 page 64, pour qu'un câble soit défini comme « Halogene Free » ou « Zero Halogene », il faut que tous les éléments donnent des teneurs de HCl inférieures à 5 mg par gramme d'échantillon. Il faut que le calcul des pH et conductivité pondérés (défini page 64) soit dans la norme imposée.

$$pH' = \log_{10} \left[\frac{\sum_i m_i}{\sum_i \left(\frac{m_i}{10^{pH_i}} \right)} \right]$$

$$C' = \frac{\sum_i C_i \times m_i}{\sum_i m_i}$$

Le pH pondéré pH' est calculé par une formule complexe, un code dans le programme peut rendre ce calcul automatique. Il empêche ainsi le risque d'erreur de calcul, ou bien la perte de temps pour un opérateur qui aurait du mal à réaliser ce calcul.

Le calcul de la conductivité pondéré C' est réalisé par une formule plus simple que le pH'. Néanmoins un code de calcul reste utile.

Code 18 pour le calcul du pH' et de la conductivité C'

```
Sub CalculHCl
'Dimensionnement des variables en tant que single
Dim PoidsGaineExt as single
Dim PoidsGaineInt as single
Dim PoidsIsolant as single
Dim PoidsBourrage as single
Dim pHGaineExt as single
Dim pHGaineInt as single
Dim pHIsolant as single
Dim pHBourrage as single
Dim CondGaineExt as single
Dim CondGaineInt as single
Dim CondIsolant as single
Dim CondBourrage as single
Dim PoidsTotal as single

'Définition des variables en fonction des valeurs des TextBox de la Userform
If UserForm5.TextBox94.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox94.Value) Then
    PoidsGaineExt = UserForm5.TextBox94.Value
Else
    PoidsGaineExt = 0
End If
If UserForm5.TextBox95.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox95.Value) Then
    PoidsGaineInt = UserForm5.TextBox95.Value
Else
    PoidsGaineInt = 0
End If
If UserForm5.TextBox96.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox96.Value) Then
    PoidsIsolant = UserForm5.TextBox96.Value
Else
    PoidsIsolant = 0
End If
If UserForm5.TextBox97.Value <> 0 And IsNumeric(UserForm5.TextBox97.Value) Then
    PoidsBourrage = UserForm5.TextBox97.Value
Else
    PoidsBourrage = 0
End If
If UserForm5.TextBox35.Text <> "" Then
    pHGaineExt = UserForm5.TextBox35.Value
```

Chapitre 6 : Programme VBA pour enregistrer, calculer, comparer et présenter les résultats

```
End If
If UserForm5.TextBox36.Text <> "" Then
    pHGainExt = UserForm5.TextBox36.Value
End If
If UserForm5.TextBox37.Text <> "" Then
    pHIsolant = UserForm5.TextBox37.Value
End If
If UserForm5.TextBox48.Text <> "" Then
    pHBourrage = UserForm5.TextBox48.Value
End If
If UserForm5.TextBox38.Text <> "" Then
    CondGainExt = UserForm5.TextBox38.Value
End If
If UserForm5.TextBox39.Text <> "" Then
    CondGainInt = UserForm5.TextBox39.Value
End If
If UserForm5.TextBox40.Text <> "" Then
    CondIsolant = UserForm5.TextBox40.Value
End If
If UserForm5.TextBox49.Text <> "" Then
    CondBourrage = UserForm5.TextBox49.Value
End If

'Calcul du poids total
PoidsTotal= Application.WorksheetFunction.Sum(PoidsGainExt, PoidsFaineInt,
PoidsIsolant, PoidsBourrage)

'Calcul de C' à la décimale près
C=Round(Application.WorksheetFunction.Sum(PoidsGainExt*CondGainExt/PoidsTotal,
PoidsGainInt*CondGainInt/PoidsTotal, PoidsIsolant*CondIsolant/PoidsTotal,
PoidsBourrage*CondBourrage/PoidsTotal), 1)

'Calcul de pH' à la décimale près
pH = Round(Application.WorksheetFunction.Log10(PoidsTotal/
(Application.WorksheetFunction.Sum((PoidsGainExt /
Application.WorksheetFunction.Power(10, pHGainExt)), (PoidsGainInt /
Application.WorksheetFunction.Power(10, pHGainInt)), (PoidsIsolant /
Application.WorksheetFunction.Power(10, pHIsolant)), (PoidsBourrage /
Application.WorksheetFunction.Power(10, pHBourrage))))), 1)

End Sub
```

Le code 18 calcule pH' et C' à une décimale près. Le code doit être tapé de façon rigoureuse pour ne pas engendrer d'erreur, il faut faire attention au nombre de parenthèses. Plusieurs calculs manuels vérifient que le code donne des valeurs correctes.

d) Essai de propagation d'incendie

The userform 'Essais sur câble' contains the following elements:

- Navigation tabs:** Propagation de flamme, Densité de fumée, Essais de corosivités, **Propagation d'incendie**, Resistance aux incendie, Oxygene Index.
- Test Status:** 'Ce test a-t-il été réalisé?' with radio buttons for 'Oui' and 'Non'.
- Propriété du câble:**
 - Section d'un conducteur*: [] mm²
 - Volume de combustible: [] l/m
 - Diametre du câble: [] mm
 - Longueur des câbles: [] m
- Conditions du laboratoire:**
 - Date de l'essai: []
 - Température (°C): []
 - Humidité (%): []
- Choix des catégories:**
 - Category A F/R
 - Category A
 - Category B
 - Category C
 - Category D
- Grid of Test Parameters:**
 - Category A F/R:** Nbr de brûleurs (radio 1/2), Air (g/min), Prop (g/min), Nbr de câbles, Burner (min), Incendie (min), Partie brûlée (m).
 - Category A:** Nbr de brûleurs (radio 1/2), Air (g/min), Prop (g/min), Nbr de câbles, Burner (min), Incendie (min), Partie brûlée (m).
 - Category B:** Air (g/min), Prop (g/min), Nbr de câbles, Burner (min), Incendie (min), Partie brûlée (m).
 - Category C:** Air (g/min), Prop (g/min), Nbr de câbles, Burner (min), Incendie (min), Partie brûlée (m).
 - Category D:** Air (g/min), Prop (g/min), Nbr de câbles, Burner (min), Incendie (min), Partie brûlée (m).
- Footer:** *LA PLUS GRANDE DES SECTIONS DES CONDUCTEURS SI IL EXISTE PLUSIEURS SECTIONS. Buttons: RETOUR, VALIDER.

Figure 6.15 : Userform pour la saisie des résultats de propagation d'incendie

La Page 4, dédiée à la saisie des résultats de l'essai de propagation d'incendie, est en figure 6.15. Comme pour les précédents essais, l'utilisateur doit renseigner la date et les conditions laboratoires. Pour ce test, la plus grande section des conducteurs (si elles sont différentes), le volume de matière inflammable, la longueur des échantillons et le diamètre sont les paramètres clés de l'échantillon. Ces informations sont importantes et doivent être renseignées.

Il existe cinq catégories de tests pour la propagation d'incendie, l'utilisateur doit choisir parmi ces tests. Pour un même câble, plusieurs catégories peuvent être réalisées. La Page 4 se modifie suivant les sélections, par exemple la Catégorie A F/R n'est réalisable que pour les câbles avec minimum un conducteur de section supérieure à 35 mm². Le code 3, qui oblige de rentrer une valeur numérique, est imposé aux TextBox concernées.

Pour tous ces essais, le standard défini dans le chapitre 4 page 57 exige que le nombre de câbles concorde au volume inflammable de l'échantillon. Ce volume est imposé par la catégorie d'essai. Les conditions d'essais tels que le nombre de brûleurs, la durée des flammes et la durée de l'incendie sont les paramètres clés de conformité au standard. Le résultat des essais est la mesure de la partie brûlée, pour être conforme au standard la partie brûlée doit être inférieure ou égale à 2,5 mètres. Ces informations relatives au standard sont introduites dans le programme afin de comparer les résultats des essais.

e) Essai de résistance aux incendies

The screenshot shows a VBA UserForm titled "Essais sur câble" with a tabbed interface. The active tab is "Resistance aux incendie". The form is organized into several sections:

- Ce test a-t-il été réalisé?**: Radio buttons for "Oui" and "Non".
- Standard de l'essai**: Radio buttons for "IEC 60331", "VDE 472-814 (FE 180)", and "BS 6387".
- Conditions du laboratoire**: Input fields for "Date de l'essai", "Température (°C)", and "Humidité (%)".
- Contrôle de la flamme**: Input fields for "Débit d'air (l/min)", "Débit de propane (l/min)", and "Température de la flamme (°C)".
- Résultats**: Input fields for "Tension (Volt)" and "Durée de l'essai (min)".
- Nombre de phases**: Radio buttons for 1, 2, 3, and 4.
- Court-circuit**: Radio buttons for "Oui" and "Non", and an input field for "Temps écoulé avant court-circuit (min)".

At the bottom of the form are two buttons: "RETOUR" and "VALIDER".

Figure 6.17 : Page5 de la Userform5 pour la saisie des résultats de résistance aux incendies

La capture d'écran en figure 6.17 illustre la page à remplir pour l'essai de résistance aux incendies. L'appareillage utilisé pour cet essai permet de réaliser des essais suivant trois standards : IEC 60331, VDE 472-814 et BS 6387. Un seul essai par câble testé peut être choisi. Les données liées à la flamme du brûleur sont entrées, c'est-à-dire les débits d'air et de propane, ainsi que la température de la flamme.

L'appareil permet d'utiliser jusqu'à quatre phases, l'utilisateur doit choisir le nombre de phases utilisées durant le test.

Pour les standards IEC 60331 et BS 6387, la tension appliquée au câble durant l'essai est sa tension assignée (jusqu'à 1 kV). Pour l'essai VDE 472-814, la tension appliquée est de 400 Volts.

Le résultat de l'essai est l'intégrité du circuit ou pas. Cette intégrité est mise en évidence par l'apparition d'un court-circuit ou non. L'utilisateur doit choisir s'il y a eu un court-circuit, le cas échéant, cela veut dire que le câble n'est pas conforme au standard. S'il n'y a pas eu de court-circuit, le câble est conforme au standard.

f) Mesure de l'Indice d'Oxygène

The screenshot shows a VBA UserForm titled "Essais sur câble" with a tabbed interface. The "Oxygene Index" tab is active. The form is divided into several sections:

- Navigation:** A row of tabs at the top: "Propagation de flamme", "Densité de fumée", "Essais de corosités", "Propagation d'incendie", "Resistance aux incendie", and "Oxygene Index".
- Test Status:** A section titled "Ce test a-t-il été réalisé?" with two radio buttons: "Oui" and "Non".
- Conditions du laboratoire:** A section with three text boxes: "Date de l'essai", "Température (°C)", and "Humidité (%)".
- Résultat:** A section with two text boxes: "Masse d'échantillon (mg)" and "Low Oxygene Index (%)".
- Low Oxygen Index:** A large section containing three sub-sections:
 - Essais sur matériaux du câble:** A list of checkboxes for "Gaine ext.", "Gaine int.", "Isolant", "Bourrage", and "Bande", each followed by an "échantillon (mg)" text box.
 - Code des matériaux:** A list of text boxes for "Gaine ext.", "Gaine int.", "Isolant", "Bourrage", and "Bande".
 - LOI:** A list of text boxes for "Gaine ext.", "Gaine int.", "Isolant", "Bourrage", and "Bande".
- Buttons:** At the bottom, there are two buttons: "RETOUR" on the left and "VALIDER" on the right.

Figure 6.18 : Page5 de la Userform5 pour la saisie des résultats d'Indice d'oxygène

La figure 6.18 illustre la partie à remplir pour l'essai de mesure d'indice d'oxygène. Hormis les conditions opératoires, il n'y a pas de paramètres clés à rentrer. La masse de l'échantillon avec son code commercial ou sa référence, et le résultat sont nécessaires. C'est une mesure qui caractérise l'inflammabilité des matériaux, les valeurs des mesures ne sont pas testées par rapport à des valeurs standards.

VII.2) Essais sur matière première

La Userform5 est utilisée pour la saisie des résultats d'essais sur une matière première. **Seulement deux essais sont présentés :**

- %HCl, pH et conductivité
- Oxygene Index

Sur les deux pages, l'utilisateur peut choisir si l'essai est réalisé ou pas. Le contenu des pages est différent de celui des essais sur câble.

a) Essais de corrosivités : mesures du pourcentage d'HCl, pH et conductivité

Essais sur un matière première

Essais de corrosivités | Oxygene Index

Ce test a-t-il été réalisé?

Oui Non

% HCl réalisé

pH et Conductivité réalisés

Conditions du laboratoire

Date de l'essai

Température (°C)

Humidité (%)

Test du pourcentage de HCL

Masse de l'échantillon (mg)

Mesure du % HCl

Mesure du pH et de la conductivité

Masse de l'échantillon (mg)

Mesure de conductivité µS/mm

Mesure de pH

RETOUR VALIDER

Figure 6.19 : Page1 de la Userform5 pour les résultats des essais de corrosivités

Comme le montre la comparaison des figures 6.15 et 6.19, la page pour remplir les résultats des essais de corrosivités pour les matières premières est beaucoup plus simple. Toutes les CheckBoxes pour choisir les parties testées du câble ont disparu.

b) essais d'indice d'oxygène

Essais sur un matière première

Essais de corrosivités | Oxygene Index

Ce test a-t-il été réalisé?

Oui Non

Résultat

Masse d'échantillon (mg)

Low Oxygene Index (%)

Conditions du laboratoire

Date de l'essai

Température (°C)

Humidité (%)

RETOUR VALIDER

Figure 6.20 : Page2 de la Userform5 pour les résultats des essais d'Indice d'oxygène

Comme pour l'essai de mesure de corrosivité, la comparaison des figures 6.18 et 6.20 montre que la page pour remplir les résultats des essais de mesure d'indice d'oxygène, est beaucoup plus simple pour les matières premières. Toutes les CheckBoxes pour choisir les parties testées du câble ont disparues. L'utilisateur ne rentre que le poids de l'échantillon ainsi que son IO.

VIII. Entrer le ou les noms des opérateurs

Lorsque l'utilisateur valide ses saisies de résultats en cliquant sur la CommandButton « VALIDER » de la Userform5, cette Userform5 disparaît et la Userform12 pour la saisie du nom des opérateurs apparaît.

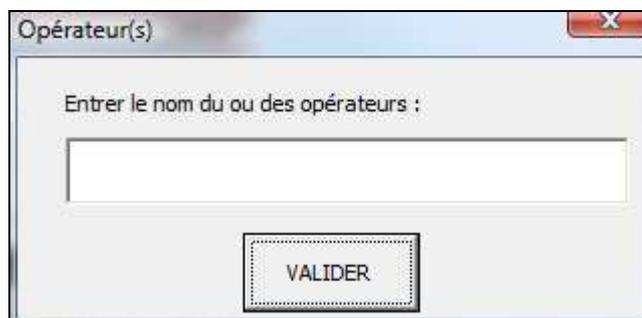


Figure 6.21 : Userform12 pour entrer le nom du ou des opérateurs

Une fois que l'utilisateur clique sur la CommandButton « VALIDER » de la Userform12 en figure 6.21, le programme se lance pour générer la feuille de résultats. Les instructions après le clique sont les suivantes :

Code 20 : Utilisation des informations pour créer la feuille de résultats

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Call NouvelPage 'Macro pour ouvrir un nouveau classeur  
If UserForm1.OptionButton3 Then  
    Call LanCableTet  
    Call LAN  
End If  
If UserForm1.OptionButton4 Then  
Call ADSLCableTet  
Call ADSL  
End If  
If UserForm1.OptionButton5 Then  
Call TelCableTet  
Call TELEKOM  
End If  
If UserForm1.OptionButton6 Then  
Call InstruCableTet  
Call Instrumentation  
End If  
If UserForm1.OptionButton7 Then  
Call ShipCableTet  
Call Shipbuilding  
End If  
If UserForm1.OptionButton8 Then  
Call RailCableTet  
Call Railway  
End If  
If UserForm1.OptionButton9 Then  
Call LowCableTet  
Call LowVoltage  
End If  
If UserForm1.OptionButton10 Then  
Call SignCableTet  
Call SIGNAL  
End If
```

Chapitre 6 : Programme VBA pour enregistrer, calculer, comparer et présenter les résultats

```
If UserForm1.OptionButton2 Then
    Call MatPrTet
    Range("a3").Select
    Selection.End(xlDown).Select
    ActiveCell.Offset(2, 0).Select
Else
    Range("f3").Select
    Selection.End(xlDown).Select
    Selection.End(xlDown).Select
    Selection.End(xlToLeft).Select
    If ActiveCell = "" Then
        ActiveCell.Offset(2, 0).Select
    Else
        Do While Not (IsEmpty(ActiveCell))
            Selection.Offset(1, 0).Select
            Loop
        ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    End If
End If
Call TitreEssai
If UserForm5.OptionButton3 Then
    Call FlamRetard
End If
If UserForm5.OptionButton1 Then
    Call Cube
End If
If UserForm5.OptionButton5 Then
    Call CorosionTest
End If
If UserForm5.OptionButton7 Then
    Call FireRetard
End If
If UserForm5.OptionButton9 Then
    Call FireResist
End If
If UserForm5.OptionButton11 Then
    Call OxygenIndexTest
End If
If UserForm5.CheckBox1.Value = True Then
    Call AddSmokeData 'Macro pour ajouter les datas de densité de fumées
End If
Call nomoperateur 'Macro pour écrire le nom des opérateurs
Call ImprimSetup 'Mise en page finale de la feuille de résultats
ActiveWorkbook.Save 'Sauvegarde de la feuille de résultats
Unload Me
Unload UserForm1
Unload UserForm2
Unload UserForm3
Unload UserForm4
Unload UserForm5
Unload UserForm6
Unload UserForm7
Unload UserForm8
Unload UserForm9
Unload UserForm10
Unload UserForm11
End
End Sub 'Cache toutes les Userfoms
```

'Si essais sur matière première
'alors une macro met en forme le haut
'de la page puis elle sélectionne la
'cellule vide de la colonne A.
'Sinon on sélectionne la cellule
'vide mais par un code plus
'complexe.

'Macro pour écrire les résultats des essais
'réalisés

'Vide le contenu de toutes les Userforms

Le code 20 montre l'acheminement général du programme. Dans un premier temps, il faut un nouveau classeur s'ouvre, ensuite suivant le type d'échantillon les macros s'exécutent pour écrire la construction du câble. Après cette étape les résultats d'essais

sont utilisés et enfin le nom de l'opérateur est écrit. Le programme se finit par la purge de toutes les Userforms.

IX. Créations de la feuille de résultats

IX.1) Ouvrir un nouveau classeur : Macro « NouvelPage »

Code 21 : Ouvrir un nouveau classeur Excel®, faire sa mise en forme générale et l'enregistrer de façon standardisée

```
Sub NouvelPage ()
ActiveSheet.Shapes("Picture 1").Select      'Copie du logo NEXANS
Selection.Copy
Range("A1").Select
Workbooks.Add      'Nouveau dossier + logo
ActiveSheet.Paste
Call PageSetup      'Mise en page générale
Dossier = UserForm1.TextBox1.Text
Code = UserForm1.TextBox3.Text
Marquage = Left(UserForm1.TextBox7.Text, 100)
Usine = "Usine : " & UserForm1.TextBox4.Text      'Identité du dossier et du
Samplong = UserForm1.TextBox10.Text      'Câble suivant la Userform1
MPS = UserForm1.TextBox6.Text
seriNo = UserForm1.TextBox5.Text
NoCommande = UserForm1.TextBox8.Text
Call SampleChoix      'Choix du type d'échantillon pour définir « sup »
dates = Format(Date, "yyyymmdd")
'Test de présence du dossier pour stocker la feuille de résultats
If Dir(ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE", vbDirectory) = "" Then
MkDir ThisWorkbook.Path & "\" & "DATA BASE"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "LAN"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "ADSL"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "TELECOM"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "INSTRUMENTATION"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "SHIP BUILDING"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "RAILWAY"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "LOW VOLTAGE"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "SIGNAL"
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "MatPr"
End If
'Forme standardisée pour le nom de dossier : date-type-code-N° de serie-dossier
'LAN
If UserForm1.OptionButton3 Then
If Dir(ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE\LAN", vbDirectory) = "" Then
MkDir ThisWorkbook.Path & "\DATA BASE" & "\" & "LAN"
End If
'Variable chemin = adresse du fichier
chemin = ThisWorkbook.Path & "\Data base\LAN\" & dates & "-" & sup & "-" & Code
& "-" & seriNo & "-" & Dossier
End If
ActiveWorkbook.SaveAs chemin 'classeur sauvé dans le dossier
End Sub
```

Le code 21 contient les premières instructions du programme. Pour commencer, le logo NEXANS est copié sur la page d'accueil illustrée en figure 6.3. Ensuite un nouveau classeur est ouvert et le logo est collé. La macro « PageSetup » réalise la mise en forme générale du classeur avec l'encadrement et l'écriture du titre de la page. Toutes les informations sont collectées pour écrire les informations de l'échantillon. Le type de câble, son code commercial et son n° de série serve pour le nom d'enregistrement du classeur.

Cette méthode permet d'avoir déjà des renseignements sur le contenu du classeur par simple lecture de son nom. De plus, le nom du classeur commence par la date de création au format aaaammjj, cela permet d'avoir un classement chronologique des classeurs dans un dossier. Ce classeur est enregistré dans un dossier « DATA BASE » situé sur le disque à coté du programme, si ce dossier n'existe pas il est créé ainsi que ses sous dossiers.



Figure 6.22 : Première partie du programme

Figure 6.22 illustre le résultat de la première partie du programme, la feuille est créée et est enregistrée sous son format normalisé. Le titre de la feuille est « TUZLA FIRE TEST LAB », le logo est placé à gauche. Toutes les informations relatives à l'échantillon sont écrites dans cette première partie.

IX.2) Construction du câble

Code 22 : Ecriture de la construction d'un câble LAN

```

Sub LAN ()
Range("A3").Select
Do While Not (IsEmpty(ActiveCell))
Selection.Offset(1, 0).Select
Loop
Range(ActiveCell, Cells(ActiveCell.Row, 9)).Select
With Selection.Font
.Name = "Book Antiqua"
.Size = 12
.Bold = True
End With
If UserForm3.OptionButton6 Then
Gaine = "Gaine PVC"
Else
Gaine = "Gaine LSZH"
End If
Isolant = "Isolant PE"
If UserForm3.OptionButton8 Then
Couleur = "Couleur Orange"
End If
If UserForm3.OptionButton9 Then
Couleur = "Couleur Gri"

End If
If UserForm3.OptionButton10 Then
Couleur = "Couleur de la gaine : " & UserForm3.TextBox1.Text
End If
    
```

'Sélection cellule vide et
'mise en forme

'Choix du matériau de la
'gaine

'Isolant est toujours PE

'Choix de la couleur de la
'Gaine

Chapitre 6 : Programme VBA pour enregistrer, calculer, comparer et présenter les résultats

```
'Pour les câble Cat5, Cat6 et Cat6HP de Tuzla les données sont connues
If UserForm3.OptionButton1 Or UserForm3.OptionButton2 Or
  UserForm3.OptionButton3 Then
  If UserForm3.OptionButton1 Then
    TitreCable = "Propriétés CAT 5"
    Ame = "Âme : Cuivre massif"
    DiamAme = "Diamètre Âme : 24 AWG"
    DiamIso = "Diamètre Isolant : 0,9 mm"
    DiamGain = "Diamètre Gaine : 4,9 mm"
    Bourrage = "Sans Cross Member"
    Poids = "Poids approximatif : 30 kg/km"
    NbrCond = "Nombre de conducteurs : 4 paires torsadées"
  End If
  If UserForm3.OptionButton2 Then
    TitreCable = "Propriétés CAT 6"
    Ame = "Âme : Cuivre massif"
    DiamAme = "Diamètre Âme : 24 AWG"
    DiamIso = "Diamètre Isolant : 1,02 mm"
    DiamGain = "Diamètre Gaine : 6,4 mm"
    Bourrage = "Avec Cross Member"
    Poids = "Poids approximatif : 43 kg/km"
    NbrCond = "Nombre de conducteurs : 4 paires torsadées"
  End If
  If UserForm3.OptionButton3 Then
    TitreCable = "Propriété CAT 6 High Performance"
    Ame = "Âme : Cuivre massif"
    DiamAme = "Diamètre Âme : 23 AWG"
    DiamIso = "Diamètre Isolant : 1,06 mm"
    DiamGain = "Diamètre Gaine : 6,1 mm"
    Bourrage = "Avec Cross Member"
    Poids = "Poids approximatif : 43 kg/km"
    NbrCond = "Nombre de conducteurs : 4 paires torsadées"
  End If

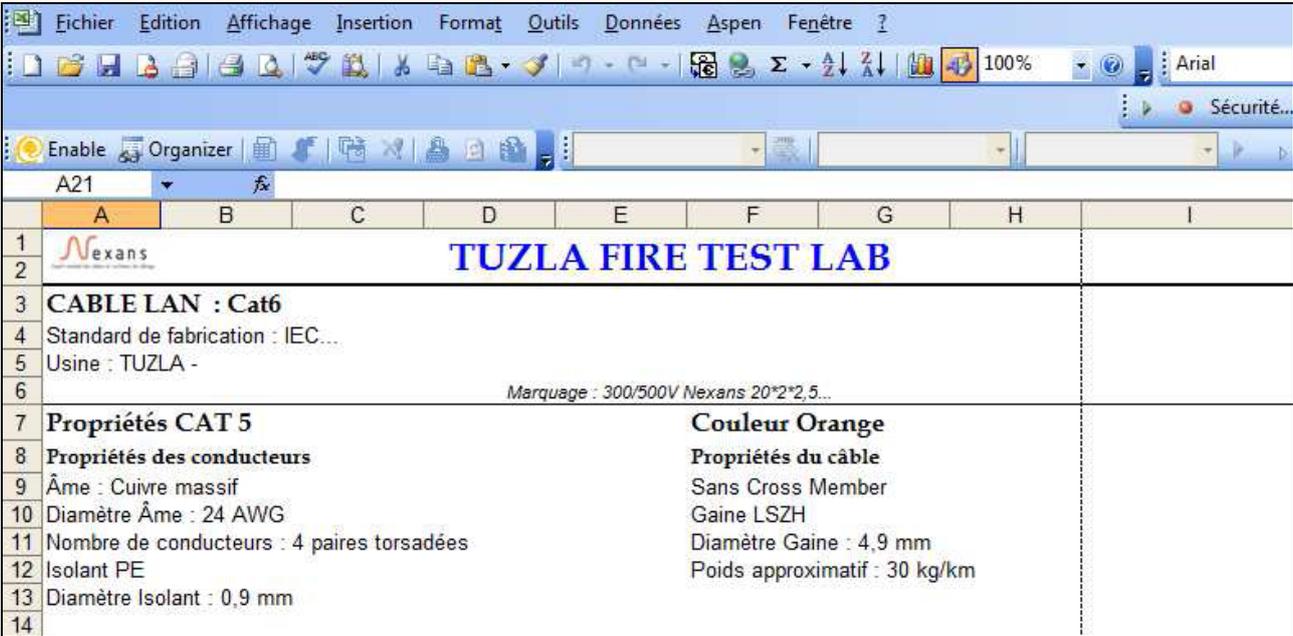
  'Ecrire les propriétés
  ActiveCell.FormulaR1C1 = TitreCable
  ActiveCell.Offset(0, 5).FormulaR1C1 = Couleur
  ActiveCell.Offset(1, 0).FormulaR1C1 = "Propriétés des conducteurs"
  ActiveCell.Offset(1, 5).FormulaR1C1 = "Propriétés du câble"
  ActiveCell.Offset(2, 0).FormulaR1C1 = Ame
  ActiveCell.Offset(3, 0).FormulaR1C1 = DiamAme
  ActiveCell.Offset(4, 0).FormulaR1C1 = NbrCond
  ActiveCell.Offset(5, 0).FormulaR1C1 = Isolant
  ActiveCell.Offset(6, 0).FormulaR1C1 = DiamIso
  ActiveCell.Offset(2, 5).FormulaR1C1 = Bourrage
  ActiveCell.Offset(3, 5).FormulaR1C1 = Gaine
  ActiveCell.Offset(4, 5).FormulaR1C1 = DiamGain
  ActiveCell.Offset(5, 5).FormulaR1C1 = Poids
End If

'Mise en forme des sous-titres
For Each cell In Range("A3:A10")
  If cell.FormulaR1C1 = "Propriétés des conducteurs" Then
    cell.Select
    With Selection.Font
      .Name = "Book antiqua"
      .Size = 10
      .Bold = True
    End With
  End If
Exit For
End If
Next
```

Chapitre 6 : Programme VBA pour enregistrer, calculer, comparer et présenter les résultats

```
For Each cell In Range("F3:F10")
    If cell.Text = "Propriétés du câble" Then
        cell.Select
        With Selection.Font
            .Name = "Book antiqua"
            .Size = 10
            .Bold = True
        End With
    End For
End If
Next
End Sub
```

Le code 22 illustre le type des codes utilisés pour écrire les propriétés des câbles. Dans cet exemple c'est un câble LAN produit à Tuzla, le programme comporte déjà quasiment toutes les propriétés de la construction du câble, l'utilisateur a juste à renseigner dans la Userform3 le type de câble (Cat5, Cat6 ou Cat6 HP), le matériau de la gaine (LSZH ou PVC) et la couleur (grise ou orange). Pour un autre type de LAN, l'utilisateur doit aussi renseigner l'isolant, le diamètre de l'âme...



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following content:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Nexans								
2	TUZLA FIRE TEST LAB								
3	CABLE LAN : Cat6								
4	Standard de fabrication : IEC...								
5	Usine : TUZLA -								
6	Marquage : 300/500V Nexans 20*2*2,5...								
7	Propriétés CAT 5				Couleur Orange				
8	Propriétés des conducteurs				Propriétés du câble				
9	Âme : Cuivre massif				Sans Cross Member				
10	Diamètre Âme : 24 AWG				Gaine LSZH				
11	Nombre de conducteurs : 4 paires torsadées				Diamètre Gaine : 4,9 mm				
12	Isolant PE				Poids approximatif : 30 kg/km				
13	Diamètre Isolant : 0,9 mm								
14									

Figure 6.23 : Partie réservée à la construction du câble

La figure 6.23 montre la mise en forme de la construction du câble sur la feuille de résultats. Sur l'exemple il s'agit d'un câble LAN Cat5, les propriétés des conducteurs et du câble sont écrites suivant deux colonnes. Pour tous les autres câbles la même mise en forme est utilisée.

IX.3) Résultats des essais

a) propagation de flamme

Comme pour l'écriture de la construction du câble, des macros sont utilisées pour écrire les résultats des essais avec une mise en forme claire.

8	Propriétés CAT 5		Couleur Gri			
9	Propriétés des conducteurs		Propriétés du câble			
10	Âme : Cuivre massif		Sans Cross Member			
11	Diamètre Âme : 24 AWG		Gaine PVC			
12	Nombre de conducteurs : 4 paires torsadées		Diamètre Gaine : 4,9 mm			
13	Isolant PE		Poids approximatif : 30 kg/km			
14	Diamètre Isolant : 0,9 mm					
15						
16	RESULTATS DES ESSAIS					STANDARD
17	Essais de propagation de flamme		Date des essais : jj/mm/aaaa			
18	Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 %					
19	-Diamètre du câble : 5 mm -longueur du câble 60 cm- Durée de flamme : 60					
20	Contrôle de la flamme 1 kW					
21	Débits contrôlés					
22	Air (l/min)	10,0	Test 1	Test 2	Test 3	Moyenne
23	Prop (ml/min)	658,0	mm	38	39	26
						34
						IEC 60332-1 Conditions OK Echantillon OK Flamme OK Résultat < 50 NO OK Standard NO OK

Figure 6.24 : Mise forme des résultats pour l'essai de propagation de flamme

La mise en forme des résultats de l'essai de propagation de flamme est en figure 6.24. La date de l'essai, les conditions du laboratoire et les propriétés de l'échantillon sont rappelées. Les débits du brûleur sont aussi notés sur la gauche de la feuille. Dans cet exemple il y a trois essais, une moyenne est donc réalisée. Le code d'écriture utilisé n'écrit que les éléments qui sont renseignés par l'utilisateur, par exemple s'il n'y a pas de date d'essais rien n'est écrit à cet emplacement, de même s'il n'y a pas de valeurs pour la température ou l'humidité du laboratoire. Sur la droite de la feuille une colonne est dédiée à la comparaison avec le standard.

Code 23 : Comparaison des valeurs avec le standard IEC 60332-2

```

If 18 < LaboSicak < 35 And 30 < Humidity < 70 Then
ActiveCell.Offset(1, 0).FormulaR1C1 = "Conditions OK"
ActiveCell.Offset(1, 0).Font.ColorIndex = 10
Else
ActiveCell.Offset(1, 0).FormulaR1C1 = "Conditions NO OK"
ActiveCell.Offset(1, 0).Font.ColorIndex = 3
End If
If (57.5 <= KabloLong And 62.5 >= KabloLong And Time = 20) Then
ActiveCell.Offset(2, 0).FormulaR1C1 = "Echantillon OK"
ActiveCell.Offset(2, 0).Font.ColorIndex = 10
Else
ActiveCell.Offset(2, 0).FormulaR1C1 = "Echantillon NO OK"
ActiveCell.Offset(2, 0).Font.ColorIndex = 3
End If
If UserForm5.TextBox124.Value <= 150 _
And UserForm5.TextBox124.Value >= 100 Then
ActiveCell.Offset(3, 0).FormulaR1C1 = "Flamme OK"
ActiveCell.Offset(3, 0).Font.ColorIndex = 10
Else
ActiveCell.Offset(3, 0).FormulaR1C1 = "Flamme NO OK"
ActiveCell.Offset(3, 0).Font.ColorIndex = 3
End If

```

```

If Test1 > 50 Or Moy > 50 Then
ActiveCell.Offset(4, 0).FormulaR1C1 = "Résultat > 50 OK"
ActiveCell.Offset(4, 0).Font.ColorIndex = 10
Else
ActiveCell.Offset(4, 0).FormulaR1C1 = "Résultat < 50 NO OK"
ActiveCell.Offset(4, 0).Font.ColorIndex = 3
End If
If ActiveCell.Offset(1, 0).FormulaR1C1 = "Conditions OK"
And ActiveCell.Offset(2, 0).FormulaR1C1 = "Echantillon OK"
And ActiveCell.Offset(3, 0).FormulaR1C1 = "Flamme OK"
And ActiveCell.Offset(4, 0).FormulaR1C1 = "Résultat > 50 OK"
Then
ActiveCell.Offset(5, 0).FormulaR1C1 = "Standard OK"
ActiveCell.Offset(5, 0).Font.ColorIndex = 10
Else
ActiveCell.Offset(5, 0).FormulaR1C1 = "Standard NO OK"
ActiveCell.Offset(5, 0).Font.ColorIndex = 3
End If

```

} 'Test le résultat

} 'Pour être conforme, ces conditions doivent être remplies

Le code 23 est un exemple qui montre comment le programme compare les valeurs des essais avec les exigences du standard, et suivant quels critères un échantillon est qualifié comme étant conforme à la norme. Dans un premier temps, le programme contrôle les conditions dans le laboratoire, il faut que la température et l'humidité soient conformes, pour tous les essais ces valeurs standards sont identiques. Dans un second temps, le programme teste si l'échantillon comporte les bonnes dimensions, ici sa taille doit être comprise entre 575 et 625 mm. Enfin le résultat de l'essai doit être supérieur à 50 mm. Pour être conforme au standard, toutes ces conditions doivent être respectées.

b) Mesure de densité de fumées

24	Mesure de densité des fumées			Date des essais : 26/05/2010	IEC 61034
25	Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 %- Dernier test de qualification 25/02/2010				Conditions OK
26	- diamètre du câble : 6 mm - longueur du câble 100 cm - nbr de câbles 7				Echantillon OK
27		Trans (%)	A0 (m²)	Durée (sec)	Résultat > 60 OK
28	Test 1	90,00	0,05	754	
29	Test 2	86,00	0,06	769	
30	Test 3	89,00	0,05	721	
				Moyenne (88±2)%	Standard OK

Figure 6.25 : mise en forme des résultats pour l'essai de densité de fumées

La mise en forme de l'essai de densité de fumées est présentée en figure 6.25. Le dernier essai de qualification de l'appareillage apparaît dès la deuxième ligne, cette indication est importante pour juger de la conformité de l'appareillage. De plus, demander cette date implique que ces essais de qualifications périodiques soient réalisés régulièrement. Les résultats de transmission de lumière sont compilés sous forme d'un tableau, bien sûr, si seulement un essai est réalisé le tableau ne comporte que deux lignes.

c) Mesure de pourcentage d'HCl, pH et conductivité

31	Mesures de %HCl, pH et conductivité							Date des essais : 21/06/2010	754-1&2
32	Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 %								Conditions OK
33		g/m	mg	%HCl		mg	pH	C μS/mm	
34	Gaine ext.	35,00	1 000,0	0,10	Gaine ext.	995,0	5,90	9,00	
35	Isolant	22,00	1 000,0	0,20	Isolant	1 002,0	6,40	0,60	
36	Bourrage	7,00	1 000,0	0,40	Bourrage	998,0	6,00	2,00	
37	Total	64,00		0,2		pH' et C'	6,0	5,3	

Figure 6.26 : mise en forme des résultats de mesures de %HCl, pH et conductivité

Les mesures de pourcentage d'HCl, pH et conductivité sont présentées sous forme de deux tableaux comme le montre la figure 7.26. Les valeurs de pH' et C' sont calculées depuis le programme à la décimale près.

d) Essai de propagation d'incendie

Essai de propagation d'incendie		Date des essais : 24/06/2010	IEC 60332-3
Température du labo 20 °C- Humidité du labo 20 %			Conditions OK
Âme 0,1 mm ² . Diamètre du câble 0,1 mm. Volume inflammable 0,1 l/m. Câbles de 3,5 m.			Câbles>3,5 m OK
CATEGORIE B. 35 câbles.Flammes pendant 40 min.Incendie pendant 45 min			Echantillon=3,5 l/m OK
Air 1500 gr/min. Prop 455 gr/min.		Partie brûlée	2 m.
			Résultat<2,5 m OK

Figure 6.27 : mise en forme des résultats de propagation d'incendie

Comme le montre la figure 6.27, les résultats de l'essai sont présentés sous la forme d'un texte. Le programme génère automatiquement ce texte suivant les données qu'il a stockées.

e) Essai de résistance aux incendies

Essais de résistance à l'incendie : intégrité du circuit		Date de l'essai : 21/05/2010	IEC 60331
Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 %			Conditions OK
Débit d'air 40 l/min. Débit de prop 5 l/min. Température de flamme 750 °C.			Temp. flamme OK
Tension 1000 Volt. 4 phases.		120 min sans court-circuit.	Pas de court-circuit OK

Figure 6.28 : mise en forme des résultats de résistance à l'incendie

Comme pour l'essai de propagation de flamme, les résultats de l'essai de résistance à l'incendie est sous forme de textes. Comme l'illustre la figure 6.28, le résultat de l'essai est la présence ou non d'un court-circuit.

f) Mesure de l'indice d'oxygène

47	Mesure de l'Indice d'Oxygène							Date de l'essai : 23/05/2010
48	Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 %							
49		Code	mg	OI (%)		Code	mg	OI (%)
50	Gaine ext.	Isoplast	5 000,0	19,00	Bourrage	Lamplas	5 000,00	21,00
51	Isolant	PE	5 000,0	20,00				
52	Essais réalisés par : Hakan							

Figure 6.29 : mise en forme de la mesure de l'indice d'oxygène

Les résultats sont présentés dans des tableaux. Comme le montre la figure 6.29, sous ce dernier test apparaît le nom de l'opérateur qui a réalisé les essais.

g) Mise en forme finale de la feuille de résultats

Pour que la feuille de résultats tienne sur une page d'impression, un dernier code effectue cette mise en forme. Comme les écritures varient très peu, les colonnes sont

dimensionnées à 9 pixels de large, sauf pour la colonne A qui est à 10,7 pixels et la colonne I (résultat des standards) à 20,4 pixels.

X. Conclusions

 TUZLA FIRE TEST LAB								
CABLE LAN : Cat6 Standard de fabrication : IEC... Usine : TUZLA - Marquage : 300/500V Nexans 20*2*2,5...								
Propriétés CAT 6 High Performance Propriétés des conducteurs Âme : Cuivre massif Diamètre Âme : 23 AWG Nombre de conducteurs : 4 paires torsadées Isolant PE Diamètre Isolant : 1,06 mm				Couleur Orange Propriétés du câble Avec Cross Member Gaine PVC Diamètre Gaine : 6,1 mm Poids approximatif : 43 kg/km				
RESULTATS DES ESSAIS						STANDARD		
Essais de propagation de flamme Date des essais : jj/mm/aaaa Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 % -Diamètre du câble : 6 mm -longueur du câble 60 cm- Durée de flamme : 60 Contrôle de la flamme 1 kW Débits contrôlés						IEC 60332-1 Conditions OK Echantillon OK Flamme OK Résultat > 50 OK Standard OK		
Air (l/min)	10,0		Test 1	Test 2	Test 3		Moyenne	
Prop (ml/min)	658,0	mm	89	112	125		109	
Mesures sur les gaz de %HCl, pH et conductivité Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 %						754-1&2 Conditions OK %HCl<0,5 OK pH>4,3 OK c<10 OK Standard OK		
	g/m	mg	%HCl	mg	pH		C µS/mm	
Gaine ext.	32,0	1 000,0	0,25	Gaine ext.	1 000,0		6,30	2,00
Isolant	7,0	1 000,0	0,23	Isolant	1 000,0		6,90	7,00
Total	39		0,2		pH' et C'	6,4	2,9	
Essais de résistance à l'incendie Test tarihi : jj/mm/aaaa Température du labo 20 °C- Humidité du labo 50 % Débit d'air 40 l/min. Débit de prop 5 l/min. Température de flamme 750 °C. Tension 1000 Volt. 4 phases. 120 min sans court-circuit.						IEC 60331 Conditions OK Temp. flamme OK Pas de court-circuit OK		
Essais réalisés par : hakan								
20110220-LAN-Cat6-0658983456-E xemple								

Figure 6.30 : Mise en forme normalisé de la feuille de résultats

Le programme ouvre un nouveau classeur Excel®. Ce nouveau classeur voit sa mise en forme normalisée de façon générale suivant les codes présents dans le programme. Les informations collectées par le programme dans les différentes Userforms sont alors écrites sur la feuille de résultats :

- Informations sur l'échantillon : collectées en figure 6.5.
- Construction du câble : collectée en figure 6.6 et 6.7.
- Résultats des essais : collectés en figure 6.8 à 6.10 et 6.15 à 6.20.
- Nom de l'opérateur : collecté en figure 6.21.

Les données présentes dans le programme permettent de comparer les résultats des essais avec les valeurs exigées par les articles standards. Le programme compare les conditions du laboratoire, l'échantillon utilisé et les résultats des essais avec les exigences du standard. Si les conditions opératoires, l'échantillon et le résultat de l'essai sont en accord avec le standard, le résultat du test est « **Standard OK** », sinon « **Standard NO OK** » est inscrit. La feuille de résultats est enregistrée dans une base de données. Cette base de données se situe sur le disque de l'ordinateur à la même adresse que le programme (s'il n'existe pas il est créé automatiquement). La base de données est un fichier avec des sous-dossiers pour chaque type de câbles et les matières premières. La feuille de résultats est alors enregistrée dans le sous-dossier qui lui est réservé suivant son type de câble. La feuille est enregistrée avec le nom suivant :

Date (aaaammjj) - Type de câble - Nom du câble - n° de série-nom d'enregistrement (figure 8.5, première « Textbox »).

Exemple : 20100409-LAN-CAT6-1710521281-Control_Prod

La date insérée automatiquement est celle de la création de la feuille de résultats. Cette date permet ainsi de classer chronologiquement les saisies des résultats et généralement les dates des essais.

Le programme fait 1,69 MB. Il est composé de 12 Userforms, 11 modules et plus d'une centaine de macro. Les codes sont simples, ils sont surtout :

- If **condition**... Then
 Instructions...
End If
- For each cells in Range ()
 If cells **conditions**... then
 Instructions...
 Exit For
End If
- Do While **Conditions**...
 Instructions...
Loop

Le programme génère donc une feuille de résultats suivant nos attentes. Les résultats collectés dans une base de données permettent d'avoir un historique des résultats et ainsi les comparer. La feuille présentée, avec un ajout de quelques commentaires et un cachet, peut servir de rapport d'essai officiel.

CONCLUSIONS GENERALES

Comme nous l'avons vu, les câbles sont construits avec des structures diverses et sont modulables suivant les besoins. Omniprésents dans l'environnement des hommes, les câbles sont en grandes quantités dans les habitations, les entreprises, les commerces, les automobiles... Ce caractère envahissant des câbles est alors une source de problèmes en cas d'incendie. Le gainage et les isolations plastiques sont des sources de combustibles, les câbles sont alors capable de propager les incendies. Comme il a été présenté, des essais standards sont instaurés par des normes telles que l'**International Electric Commission** (IEC) afin de qualifier le comportement du câble vis-à-vis du feu. Ces essais testent principalement la capacité du câble à propager les flammes ou un incendie, et la résistance du câble aux incendies (durée pour laquelle le produit continue de jouer son rôle). Ces essais mesurent aussi la composition des fumées de combustion ainsi que leurs opacités.

Le site de NEXANS de TUZLA s'est équipé d'un nouveau laboratoire avec les installations pour réaliser les essais incendies standards du IEC. Ce laboratoire a pour but de contrôler la production et les matières premières. La principale mission lors du stage a été de mettre en service ce laboratoire avec l'aide de Sultan KÖSEOGLU (ingénieure experte) et supervisé par Kamil MUTLU (directeur Qualité-Contrôle). Les installations ont été fournies par une société Suisse (FTT), les normes sont internationales et le laboratoire se trouve à Istanbul. C'est ce dernier point qui retiendra particulièrement mon intention, mettre en service un laboratoire aux standards internationaux dans un pays loin du « standard » international, fût un travail quelques fois laborieux. En effet, les machines sont toutes aux standards internationaux mais pas l'environnement où elles se trouvent. Après divers aménagements, grâce à une équipe de maintenance très réactive, et l'installation des machines, les premiers essais sur câble ont pu être réalisés.

Les essais furent réalisés dans un premier temps par moi-même, mais la formation d'un technicien est nécessaire pour faire vivre le laboratoire. Avec une seule personne disponible, et un temps de formation restreint de quelques heures par semaine au maximum, la formation se fera essentiellement grâce à la rédaction de modes opératoires des essais qui synthétisent les articles standards, et détaillent l'utilisation et le fonctionnement des installations. Ces modes opératoires sont les outils de base de la formation aux essais. Après avoir lu et corrigé les modes opératoires avec le technicien et les ingénieurs, des essais pratiques ont été effectués ensemble. Cette partie du stage fut enrichissante car elle m'a permis de former une personne, et surtout d'offrir un outil formateur à NEXANS qui aidera à l'apprentissage des techniciens ultérieurs.

Une fois le laboratoire en service, les essais se réalisent et des résultats arrivent. La dernière tâche du mémoire fut de réaliser un programme sous VBA pour enregistrer, archiver et présenter de façon standard les résultats des essais. Avec seulement 20 heures de formation en VBA durant mon année de licence, et ma faible connaissance du secteur d'activité je me suis fixé un objectif assez ambitieux. Créer un programme capable de construire le design des milliers de types de câbles fut la partie la plus difficile. Choisir les essais réalisés et présenter les résultats font appel à des codes longs mais simples. La gestion des erreurs est une étape laborieuse qui a été surmontée. Le programme fonctionne, il enregistre les résultats sous un nom de fichier standardisé, il calcule des mesures, il compare les valeurs des essais avec les exigences des standards et il présente les résultats avec toutes les propriétés liées à l'échantillon d'essai.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Site internet du groupe Nexans :
www.nexans.com
Consulté en novembre 2009
- [2] Brochure du groupe Nexans :
http://www.nexans.com/eservice/Corporate-fr/fileLibrary/Download_540152170/Corporate/files/NexansFR.pdf
Consulté en novembre 2009
- [3] Logo du groupe Nexans : <http://www.nexans.com/images/header/logo.gif>
Consulté en novembre 2009
- [4] Planisphère de l'implantation de Nexans dans le monde :
http://www.nexans.com/Corporate/2008/world_map_Nov2008.jpg
Consulté en novembre 2009
- [5] Photographie du navire câblé Skagerrak :
http://www.nexans.com/Corporate/2009/skagerrak_500_1.jpg
Consulté en novembre 2009
- [6] Photographie du train à grande vitesse chinois :
http://www.nexans.com/Corporate/2008/EMU_Chine_illu.jpg
Consulté en novembre 2009
- [7] Photographie d'un robot martien :
<http://www.nexans.com/upload/objects/20040330/opportunity-Nasa-200.jpg>
Consulté en novembre 2009
- [8] Photographie du stade olympique de Pékin :
<http://www.villiard.com/merveilles-de-chine/Stade-olympique-de-Beijing-Chine.jpg>
Consulté en novembre 2009
- [9] Alain GUYOT. « Polymérisation ». Techniques de l'Ingénieur. Référence J 5830.
- [10] Stéphane PUISSANT et Pierre-Yves BONVIN. « Lignes d'extrusion en câblerie - Câbles. Contrôle qualité. Rentabilité ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AM 3640.
- [11] Stéphane PUISSANT et Pierre-Yves BONVIN. « Lignes d'extrusion en câblerie - Etapes de fabrication ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AM 3641.
- [12] Michel PAYS. « Câbles de transport d'énergie - Applications ». Techniques de l'Ingénieur. Référence D 4521.
- [13] Guy SINONNET. « Tréfilage de l'acier ». Techniques de l'Ingénieur. Référence M 645.

- [14] Rémi CHARPIGNY et Robert NOSSENT. « Mise en forme de l'aluminium - Tréfilage et étirage ». Techniques de l'Ingénieur. Référence M 652.
- [15] Guy TRAPIED. « Mise en forme du cuivre et des alliages de cuivre ». Techniques de l'Ingénieur. Référence M 660.
- [16] Norme IEC 60228. « Âme des câbles isolés ». Numéro de référence CEU/IEC 60228 : 2004. Troisième édition.
- [17] Photographie d'un câble avec conducteur toronné
<http://www.leadcable.com.my/images/prod-acsr.jpg>
Consulté en mars 2010
- [18] Photographie d'un câble avec conducteur toronné et compacté.
<http://www.ecmweb.com/mag/701ecmALUMpic1.jpg>
Consulté en mars 2010
- [19] Photographie d'un câble avec conducteur flexible.
http://www.germes-online.com/direct/dbimage/50196816/Welding_Cable.jpg
Consulté en mars 2010
- [20] Françoise BERZIN et Guo-Hua HU. « Procédés d'extrusion réactive ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AM 3654.
- [21] M.J. ROGERSON B.Sc. « What is crosslinked polyethylene and why do we use it ? ». <http://www.pexasassociation.net/uploads/files/WHAT%20IS%20CROSSLINKED%20POLYETHYLENE.pdf>
Consulté en février 2010
- [22] Pr. J. LECOMPTE-BECKER. « Physique des Matériaux : Partie Polymères - Chapitre 2 : distinction des polymères ». <http://www.metaux.ulg.ac.be/Fichierpourtelech/polym/ch%202.pdf>
Consulté en février 2010
- [23] Brochure DEGUSA. DYNASYLAN® - DYNASYLAN SILFIN®
http://svn.assembla.com/svn/camsi-x/src/fe/CABLES_CONDUCTORES/Degussa-WireCable.pdf
Consulté en mars 2010
- [24] Michel PAYS. « Câbles de transport d'énergie - Technologie. Caractéristiques ». Techniques de l'Ingénieur. Référence D 4520.
- [25] Henri KUZYK. « Câbles d'énergies : recherche et identification de défauts ». Techniques de l'Ingénieur. Référence D 4541v2.
- [55] Alain TOUREILLE. « Mesures électriques des matériaux diélectriques solides ». Techniques de l'Ingénieur. Référence R 1115v2.

- [56] Photographie d'une muscovite
http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/CRG/BM26/SaxsWaxs/Sxwxsample/AboutMica/Images/mica_2
Consulté en mars 2010
- [28] Véronique DIAS et Jacques VANDOOREN. « Chimie de la combustion – Flamme à base d'hydrocarbures ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AF 6210.
- [29] Jean-Michel d'HOOP. « Sécurité incendie bâtiment ». Techniques de l'Ingénieur. Référence SE 2050.
- [30] Christian VOVELLE et Jean-Louis DELFAU. « Combustion des plastiques ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AM 3170.
- [31] Jean BROSSAS. « Retardateurs de flammes ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AM 3237.
- [32] Pauline PIRNGADI et Stefan RICHTER. « New Developments in the Application of Nanoclays for HFFR Cable Compounds ».
http://ecadigitallibrary.com/pdf/IWCS05/IWCS0582_Ike.pdf
Consulté en mai 2010
- [33] Siobhan AHERN et Maryline DESSEIX. « Meeting smoke, toxicity and flame retardancy requirements for railway cable applications ». Présentation PolyOne® Novembre 2009.
http://www.ukintpress-conferences.com/conf/09rix_conf/pdfs/Day%202/8_Polyone.pdf
Consulté en mai 2010
- [34] Standard : CEI IEC 60332-1-1 : Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable - Apparatus.
- [35] Standard : CEI IEC 60332-1-2 : Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable - Procedure for 1 kW pre-mixed flame.
- [36] Standard : CEI IEC 60332-2-1 : Test for vertical flame propagation for a single small insulated wire or cable - Apparatus.
- [37] Standard : CEI IEC 60332-2-2 : Test for vertical flame propagation for a single small insulated wire or cable - Procedure for diffusion flame.
- [38] Standard : CEI IEC 60695-11-2 : Test flames : 1 kW premixed flame – Apparatus, confirmatory test arrangement and guidance.
- [39] Standard : CEI IEC 61034-1 : Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions – Part 1: Test apparatus

- [40] Standard : CEI IEC 61034-2 : Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions – Part 2: Test procedure and requirements
- [41] Standard : CEI IEC 60331-11 : tests for electric cables under fire conditions- Circuit integrity- Part 11 :Apparatus – Fire Alone at a flame temperature of at least 750°C.
- [42] Standard : CEI IEC 60331-21 : tests for electric cables under fire conditions- Circuit integrity- Part 21 : Procedures and requirements- Cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV.
- [43] Standard : CEI IEC 60331-23 : tests for electric cables under fire conditions- Circuit integrity- Part 23 : Procedures and requirements- electric data cables
- [44] Brochure LEONI ®
http://www.leoni.com/uploads/tx_downloadleoni/en_brandschutz_06.pdf
Consulté en novembre 2009
- [45] Standard : CEI IEC 60332-3-10 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- Part 3-10 : test for vertical flame spread of vertically - mounted bunched wires or cables – Apparatus.
- [46] Standard : CEI IEC 60332-3-21 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- Part 3-21 : test for vertical flame spread of vertically - mounted bunched wires or cables – Category A F/R.
- [47] Standard : CEI IEC 60332-3-22 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- Part 3-22 : test for vertical flame spread of vertically - mounted bunched wires or cables – Category A.
- [48] Standard : CEI IEC 60332-3-23 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- Part 3-23 : test for vertical flame spread of vertically - mounted bunched wires or cables – Category B.
- [49] Standard : CEI IEC 60332-3-24 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- Part 3-24 : test for vertical flame spread of vertically - mounted bunched wires or cables – Category C.
- [50] Standard : CEI IEC 60332-3-25 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- Part 3-10 : test for vertical flame spread of vertically - mounted bunched wires or cables – Category D.
- [51] Standard : CEI IEC 754-1 : Test on gases evolved during combustion of materials from cables – Part 1 : determination of the amount of halogen acid gas.
- [52] Standard : CEI IEC 754-2 : Test on gases evolved during combustion of materials from cables – Part 2 : determination of the degree of acidity of gases evolved during the combustion of materials taken from electric cables by measuring pH and conductivity.

- [53] Alain SAINRAT et Loïc CHESNE. « Essais normalisés de réaction au feu ». Techniques de l'Ingénieur. Référence AM 3540.
- [54] International standard ISO 4589-1 : Plastics – Determination of burning behaviour by oxygen index – Part 1 : Guidance. First edition 1996-12-15.
- [55] International standard ISO 4589-2 : Plastics – Determination of burning behaviour by oxygen index – Part 2 : Ambient-temperature test. First edition 1996-07-15.
- [56] International standard ISO 4589-3 : Plastics – Determination of burning behaviour by oxygen index – Part 3 : Elevated-temperature test.
- [57] Jacques CHAINEAUX et Agnès JANES. « Réglementation ATEX – Evaluation analytique des risques ». Techniques de l'Ingénieur. Référence SE 3250.
- [58] Alain CZYZ. « Réglementation ATEX – Appareils et systèmes de protection ». Techniques de l'Ingénieur. Référence SE 3251.

ANNEXES

ANNEXE B.1 : CONSTRUCTION DES CONDUCTEURS [16]

Tableau 1 : Conducteurs classe 2. Nombre minimum de fils élémentaires

Section du conducteur (mm ²)	Nombre minimum de fils élémentaire pour le conducteur					
	Toronné		Toronné et compacté		Toronné et mise en forme	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
0,5	7	-	-	-	-	-
0,75	7	-	-	-	-	-
1	7	-	-	-	-	-
1,5	7	-	6	-	-	-
2,5	7	-	6	-	-	-
4	7	-	6	-	-	-
6	7	-	6	-	-	-
10	7	7	6	6	-	-
16	7	7	6	6	-	-
25	7	7	6	6	6	6
35	7	7	6	6	6	6
50	19	19	6	6	6	6
70	19	19	12	12	12	12
95	19	19	15	15	15	15
120	37	37	18	15	18	15
150	37	37	18	15	18	15
185	37	37	30	30	30	30
240	37	37	34	30	30	34
300	61	61	34	30	30	34
400	61	61	53	53	53	53
500	61	61	53	53	53	53
630	91	91	53	53	53	53
800	91	91	53	53	53	-
1000	91	91	53	53	53	-

ANNEXE B.1 : CONSTRUCTION DES CONDUCTEURS [16]

**Tableau 2 : Diamètre maximum des fils
élémentaires des classes 5 et 6**

Section du conducteur en (mm ²)	sections maximums des fils élémentaire (mm ²)	
	Classe 5	Classe 6
0,5	0,21	0,16
0,75	0,21	0,16
1	0,21	0,16
1,5	0,26	0,16
2,5	0,26	0,16
4	0,31	0,16
6	0,31	0,21
10	0,41	0,21
16	0,41	0,21
25	0,41	0,21
35	0,41	0,21
50	0,41	0,31
70	0,51	0,31
95	0,51	0,31
120	0,51	0,31
150	0,51	0,31
185	0,51	0,41
240	0,51	0,41
300	0,51	0,41
400	0,51	-
500	0,61	-
630	0,61	-

Mise en Service d'un Laboratoire d'Essais Incendie pour Câbles. Création d'un Programme pour Base de Données en VBA.

Mémoire d'Ingénieur CNAM, Paris 2011

Résumé

Les câbles sont des produits du quotidien dont la fabrication est contrôlée par des normes internationales. Les normes de résistance au feu impliquent des essais sur le produit fini (câbles) et les matières premières. Un laboratoire d'essai incendie est particulier, les outils sont de tailles importantes et robustes. La mise en service de ce type de laboratoire doit être réalisée en gardant à l'esprit le caractère dangereux des flammes. Une fois en service, les risques sanitaires doivent être contrôlés et maîtrisés.

Le fonctionnement d'un nouveau laboratoire est source de nouveaux résultats sur les produits. Pour faciliter le contrôle de productions, les variations entre les matériaux et la conformité aux standards un programme en langage VBA est écrit. Ce programme permet l'acquisition, la présentation, la comparaison aux standards et l'archivage sous une base de données des résultats d'essais.

Mots clés : NEXANS, câbles, polymères, procédés câbliers, extrusion, incendie, essais de normes IEC, VBA.

Summary

Cables are products whose manufacture is controlled by international standards. The fire resistance standards involve testing the finished product (cables) and raw materials. A fire test laboratory is specific, the apparatus used for the tests are robust and bulky. The commissioning of such laboratory shall be made bearing in mind the hazardous nature of the flames. Once in service, health risks must be controlled.

The operation in a new laboratory is a source of new results about products. To facilitate the control of production, variations between the materials and compliance with standards a VBA program is written. This program allows the acquisition, presentation, comparison standards and archiving in a database the tests' results.

Key words : NEXANS, cable, polymers, cable's process, extrusion, fire, IEC standard test, VBA.