



Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites d'emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers - Application à la lutte contre le feu par des essais sur l'Homme en conditions opérationnelles

Francis Jacques

► To cite this version:

Francis Jacques. Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites d'emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers - Application à la lutte contre le feu par des essais sur l'Homme en conditions opérationnelles. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008. Français. NNT : 2008EMSE0020 . tel-00786261

HAL Id: tel-00786261

<https://theses.hal.science/tel-00786261>

Submitted on 8 Feb 2013

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.



N° d'ordre : 485 SGE

THESE
présentée par

Francis JACQUES

Pour obtenir le grade de Docteur
de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

Spécialité : Science et Génie de l'Environnement

*Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites
d'emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-
pompiers – Application à la lutte contre le feu par des essais sur
l'Homme en conditions opérationnelles*

Soutenue à Alès le 24 juin 2008

Membres du jury

P. GALLICE	Professeur, Université Aix-Marseille 2	Rapporteur
J. VIRET	Professeur, Université Montpellier I	Rapporteur
D.GRAILLOT	Professeur, Ecole des Mines de Saint Etienne	Examineur
G. SAVOUREY	Médecin en chef, HDR, CRSSA	Examineur
G. DUSSE	Maître de recherche, Ecole des Mines d'Alès	Directeur de thèse
A. BONY-DANDRIEUX	Maître-assistant, Ecole des Mines d'Alès	Encadrant
D. PARISSE	Colonel, Chef d'Etat Major de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris	Invité

■ Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
MECANIQUE ET INGENIERIE
GENIE DES PROCEDES
SCIENCES DE LA TERRE
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
MATHEMATIQUES APPLIQUEES
INFORMATIQUE
IMAGE, VISION, SIGNAL
GENIE INDUSTRIEL
MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
P. BURLAT Professeur – Centre G2I
Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

■ Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
BERNACHE-ASSOLANT	Didier	PR 1	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 2	Informatique	G2I
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	MA	Sciences de l'inform. & com.	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
CARRARO	Laurent	PR 1	Mathématiques Appliquées	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	ICM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSÉ	David	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	CIS
DRIVER	Julian	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	CR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GOEURIOT	Patrice	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUILHOT	Bernard	DR	Génie des Procédés	CIS
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
KLÖCKER	Helmut	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MOLIMARD	Jérôme	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 1	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	CR	Sciences de la Terre	SITE
THOMAS	Gérard	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 1	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 1 Professeur 1^{ère} catégorie
PR 2 Professeur 2^{ème} catégorie
MA(MDC) Maître assistant
DR (DR1) Directeur de recherche
Ing. Ingénieur
MR(DR2) Maître de recherche
CR Chargé de recherche
EC Enseignant-chercheur
ICM Ingénieur en chef des mines

Centres :

SMS Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels
SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
G2I Génie Industriel et Informatique
CMP Centre de Microélectronique de Provence
CIS Centre Ingénierie et Santé

Remerciements

J'adresse tous mes remerciements au Général Richard LEFEVRE, commandant la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris de 1998 à 2001 et au Général PRIEUR, actuel commandant la Brigade pour avoir contribué au bon déroulement de cette thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Didier GRAILLOT pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury, à Messieurs les Professeurs Jean VIRET et Philippe GALLICE pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur, ainsi qu'au Médecin-chef Gustave SAVOUREY et au Colonel Dominique PARISSE les membres du jury.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur Gilles DUSSERE, pour avoir assuré la direction de ce travail, et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à la réalisation de cette thèse.

J'exprime également ma reconnaissance particulière à Madame Aurélia BONY, pour son avis éclairé et ses compétences scientifiques qui ont constitué un appui constant dans l'encadrement de ce travail.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Monsieur Bernard WARME-JANVILLE du Centre d'Etudes du Bouchet, le Colonel Patrick FIEVET, le Commandant Claude CHELINGUE de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris et à Monsieur René DOSNE qui ont activement contribué à la réussite de ce travail.

Je remercie chaleureusement l'ensemble de l'équipe risques industriels et naturels et mes amis de la Brigade pour leur bonne humeur et leur écoute.

Enfin, je termine par une pensée spéciale pour mon épouse, Nicole, et mes enfants Coralie et Stéphane, qui m'aident et me supportent depuis longtemps avec énormément de tendresse.

La sécurité du sapeur-pompier en intervention et notamment lors de l'extinction du feu étant plus que jamais d'actualité, cette thèse s'est inscrite dans la démarche globale menée par la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris afin d'améliorer le niveau de maîtrise de la sécurité du porte lance dans sa mission de lutte contre les incendies en milieu semi clos. A cet effet, je tiens à remercier tous les sapeurs-pompiers de Paris qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et tout particulièrement ceux qui se sont prêtés aux essais sur l'Homme.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	2
LISTE DES TABLEAUX.....	2
LEXIQUE.....	2
 INTRODUCTION GÉNÉRALE	 2
 CHAPITRE 1. LES RISQUES ET LES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION LIÉS AUX INTERVENTIONS DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE	 2
1.1. L'activité opérationnelle des pompiers en France et les dangers du métier de sapeur-pompier	2
1.2. Les équipements de protection individuelle (EPI).....	2
 CHAPITRE 2. CARACTÉRISTIQUES DES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE.....	 2
2.1. Détermination des caractéristiques techniques et ergonomiques des ensembles d'intervention	2
2.2. Détermination de la résistance à la vapeur d'eau des ensembles d'intervention.....	2
 CHAPITRE 3. COMPORTEMENT ET RÉACTION AU FEU DES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION	 2
3.1. Comportement des équipements soumis à un flux thermique modéré.....	2
3.2. Comportement des équipements soumis à un flash thermique	2
3.3. Synthèse	2

**CHAPITRE 4. ETUDES PRÉLIMINAIRES AUX ESSAIS SUR L'HOMME EN
CONDITIONS RÉELLES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE..... 2**

4.1. Simulations numériques de scénarios laboratoire et opérationnel 2

4.2. Essais sur l'Homme en laboratoire sur tapis motorisé 2

**CHAPITRE 5. DÉFINITION DES DURÉES D'ENGAGEMENT DU SAPEUR-
POMPIER EN CONDITIONS RÉELLES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE 2**

5.1. Protocole expérimental..... 2

5.2. Evaluation des durées d'engagement 2

5.3. Validation et confirmation des durées d'engagement sous ARI 2

5.4. Synthèse des tests en conditions réelles de lutte contre l'incendie 2

CONCLUSION 2

BIBLIOGRAPHIE 2

TABLE DES MATIÈRES..... 2

ANNEXE..... 2

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Zone d'action de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris	2
Figure 1.2 : Répartition des activités opérationnelles des sapeurs-pompiers en France (DDSC, 2004)	2
Figure 1.3 : Durée moyenne des interventions en 2003 (BSPP-BOPE, 2004)	2
Figure 1.4 : Décès en service (DDSC, 2005)	2
Figure 1.5 : Accidents en service des sapeurs-pompiers professionnels (DDSC, 2005)	2
Figure 1.6 : Accidents en service des sapeurs-pompiers volontaires (DDSC, 2005)	2
Figure 1.7 : Répartition des incendies dans la journée en 2003 (BSPP-BOPE, 2004)	2
Figure 1.8 : Temps passé sur feux en 2003 (BSPP-BOPE, 2004)	2
Figure 1.9 : Répartition des incendies en fonction de la nature du feu et de l'aliment principal (BSPP-BOPE, 2004)	2
Figure 1.10 : Répartition des affections touchant les victimes d'incendie (BSPP-BOPE, 2005)	2
Figure 1.11 : Brûlures aux oreilles (photo BSPP)	2
Figure 1.12 : Nombre de brûlés par tranche d'âge (BSPP-SMU, 2004)	2
Figure 1.13 : Facteur de profondeur (BSPP-SMU, 2004)	2
Figure 1.14 : Nombre de brûlures par localisation (Fortin et al., 2004)	2
Figure 1.15 : Brûlures au cou et à la face (Photo BSPP)	2
Figure 1.16 : Taux d'incidence (%) des brûlures par année et rapport au nombre des incendies traités (Fortin et al., 2004)	2
Figure 1.17 : Taux d'incidence (%) des brûlures par année et rapport à l'effectif de la brigade (Fortin et al., 2004)	2
Figure 1.18 : Accidentologie sur feu à la BSPP (BSPP-BOPE, 2005)	2
Figure 1.19 : Blouse Paulin (photo BSPP)	2
Figure 1.20 : Appareil respiratoire Draeger (photo BSPP)	2
Figure 1.21 : Appareils respiratoires Gughelminette (photo BSPP)	2
Figure 1.22 : Appareil respiratoire isolant SPF1 (photos BSPP)	2
Figure 2.1 : « Equipement E1 » dit de l'ancienne génération, sans ARI (Photos BSPP).	2
Figure 2.2 : « Equipement E2Co » dit de nouvelle génération (Photos BSPP).	2
Figure 2.3 : Perméabilimètre à l'air FX 3300 (Photo Empa)	2
Figure 2.4: Centrale d'enregistrement et mannequin instrumenté (Photo CEB)	2
Figure 2.5 : Tenue de base (à gauche), Equipement E1 (au centre), Equipement E2Co sur mannequin (à droite) (Photo BSPP)	2
Figure 2.6 : SAM, mannequin articulé thermique (Photo Empa)	2
Figure 2.7 : Mannequin équipé d'un polo F1 ML de référence (à gauche), d'un échantillon MC (au centre), d'un échantillon ML (à droite) (Photos CEB)	2
Figure 2.8 : Mannequin SAM, revêtu d'une couche hydrophile (Photos Empa)	2
Figure 2.9 : Parties actives (rouges) et inactives (vertes)	2
Figure 2.10 : Résistance thermique sèche pour les configurations de tenues textiles	2
Figure 2.11 : Puissance de chauffage moyenne après dix minutes de chauffe pour les différentes configurations de tenue textile et pour les deux phases	2
Figure 2.12 : Résistance évaporatoire pour les configurations de tenue textile après une durée de chauffe de dix minutes	2
Figure 2.13 : Quantité d'eau condensée dans les différents effets d'habillement	2

Figure 3.1 : Mannequin « Henry » avec capteurs de température et de flux thermique dans la chambre de combustion (Photo Empa)	2
Figure 3.2 : Répartition des capteurs sur le mannequin (1 ^{ère} phase à gauche, 2 ^{ème} phase à droite)	2
Figure 3.3 : Source de chaleur radiante (Photo Empa)	2
Figure 3.4 : Températures mesurées avec la camera thermographique (Photo Empa)	2
Figure 3.5 : Température moyenne en surface	2
Figure 3.6 : Augmentation de température moyenne sur le torse et l'abdomen	2
Figure 3.7 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E1	2
Figure 3.8 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E2	2
Figure 3.9 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E3	2
Figure 3.10 : Risque de brûlure à 5 kW/m ²	2
Figure 3.11 : Evolution de la température de surface pour l'ensemble E3	2
Figure 3.12 : Température moyenne en surface (Ensembles E2Co et E3)	2
Figure 3.13 : Augmentation de température moyenne sur le torse et l'abdomen (Ensembles E2Co et E3)	2
Figure 3.14 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E2Co à 5 kW/m ² après 240 secondes	2
Figure 3.15 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E3 à 5 kW/m ² après 240 secondes	2
Figure 3.16 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E2Co à 10 kW/m ² après 120 secondes (2 tests)	2
Figure 3.17 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E3 à 10 kW/m ² après 120 secondes (2 tests)	2
Figure 3.18 : Eau évaporée dans le sous-vêtement	2
Figure 3.19 : Thermo-man ^{md} (Photo DuPont De Nemours)	2
Figure 3.20 : Mannequin vêtu de sous-vêtements courts (à gauche) et longs (à droite) (Photos BSPP)	2
Figure 3.21 : Mannequin équipé (à gauche) puis soumis au flash thermique (à droite) (Photos BSPP)	2
Figure 3.22 : Etat général de l'équipement E1 (Photo BSPP)	2
Figure 3.23 : Gant en cuir, avant et après le flash thermique (Photo BSPP)	2
Figure 3.24 : Equipement E1 après le flash thermique (test n°1) (Photo BSPP)	2
Figure 3.25 : Equipement E1 avec sur-pantalon après le flash thermique (test n°2) (Photo BSPP)	2
Figure 3.26 : Etat général après les tests n°3 (à gauche) et 4 (à droite) (Photos BSPP)	2
Figure 3.27 : Destruction du marquage et des coutures (Photo BSPP)	2
Figure 3.28 : Etat de la membrane imper-respirante après le flash thermique (test n°4) (Photo BSPP)	2
Figure 3.29 : Sur-pantalon textile mono-couche après le flash thermique (test n°3) (Photo BSPP)	2
Figure 3.30 : Sur-pantalon multicouches avec membrane après le test n°4 (Photo BSPP)	2
Figure 3.31 : Gant en textile avant et après le flash thermique (Photo BSPP)	2
Figure 3.32 : Localisation des brûlures lors du test n°1, avec le polo F1 MC (à gauche)	2
Figure 3.33 : Localisation des brûlures lors du test n°1, avec le polo F1 ML (à droite)	2
Figure 3.34 : Localisation des brûlures lors du test n°2 (tenue E1 avec sur-pantalon)	2
Figure 3.35 : Brûlures aux membres inférieurs (Photos BSPP)	2
Figure 3.36 : Brûlures aux avant-bras et épaules (photo Lebars)	2
Figure 3.37 : Localisation des brûlures lors du test n°3	2
Figure 3.38 : Localisation des brûlures lors du test n°4	2
Figure 4.1 : Seuil d'alarme pour un sujet non acclimaté (Cholat, 2006)	2

Figure 4.2 : Surcoût physiologique dû aux équipements E1 et E2Co	2
Figure 4.3 : Evolution des limites de sécurité en fonction de l'intensité de la charge de travail	2
Figure 4.4 : Evolution des limites de sécurité en fonction de la température ambiante	2
Figure 4.5 : Evolution des limites de sécurité en fonction de la charge radiante	2
Figure 4.6 : Evolution de la limite de sécurité en fonction de l'hygrométrie relative	2
Figure 4.7 : Evolution de la fréquence cardiaque	2
Figure 4.8 : Evolution de la température interne et cutanée avec l'équipement E1	2
Figure 4.9 : Evolution de la température interne et cutanée avec l'équipement E2Co	2
Figure 4.10: Sondes de température (photo CEB)	2
Figure 4.11 : Chronologie du scénario laboratoire	2
Figure 4.12 : Phase d'attente assise (Photo BSPP)	2
Figure 4.13 : Phase de marche (Photo DGA/CEB)	2
Figure 4.14 : Evolution de la fréquence cardiaque mesurée	2
Figure 4.15 : Evolution de la température interne mesurée	2
Figure 4.16 : Evolution du stockage thermique moyen	2
Figure 5.1 : Maison du feu de Villeneuve Saint-Georges (Photo BSPP)	2
Figure 5.2 : Maison du feu du Fort de la Briche (dessins RD)	2
Figure 5.3 : Pesée après effort, réhydratation, bilan médical final (Photos BSPP)	2
Figure 5.4 : Scénario opérationnel (Dessin RD)	2
Figure 5.5 : Enfilage de l'équipement (Photos BSPP)	2
Figure 5.6 : Etablissement de manœuvre (Photo BSPP)	2
Figure 5.7 : Reconnaissance de SIM 1 (Photo BSPP)	2
Figure 5.8 : Etablissement de la lance (Photo BSPP)	2
Figure 5.9 : Mesures de sécurité (à gauche) (Photo BSPP)	2
Figure 5.10 : Attaque du feu SIM 2 (à droite) (Photo BSPP)	2
Figure 5.11 : Progression entre SIM 2 et SIM 3 (à gauche) (Photo BSPP)	2
Figure 5.12 : Attaque du feu SIM 3 (à droite) (Photo BSPP)	2
Figure 5.13 : Evolution de la fréquence cardiaque moyenne	2
Figure 5.14 : Evolution de la température centrale moyenne mesurée	2
Figure 5.15 : Evolution de la température centrale moyenne mesurée	2
Figure 5.16 : Evolution de l'indice de charge physique	2
Figure 5.17 : Evolution de la fréquence cardiaque moyenne en fonction du temps	2
Figure 5.18 : Evolution de la température centrale moyenne en fonction du temps	2
Figure 5.19 : Elévation de la température sur le thorax	2
Figure 5.20 : Evolution de la température sur le bras	2
Figure 5.21 : Evolution de la température sur la cuisse	2
Figure 5.22 : Evolution de la température au niveau du mollet	2
Figure 5.23 : Evolution du stockage thermique	2
Figure 5.24 : Indice de charge physique	2

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les équipements testés	2
Tableau 2.2 : Bilan massique de chaque équipement.....	2
Tableau 2.3 : Caractéristiques de perméabilité à l'air.....	2
Tableau 2.4 : Bilan des isollements thermiques pour l'équipement E1	2
Tableau 2.5 : Bilan des isollements thermiques pour l'équipement E2Co	2
Tableau 2.6 : Mesures réalisées sur seize échantillons de sous-vêtements à manches courtes..	2
Tableau 2.7 : Mesures réalisées sur douze échantillons de sous-vêtements à manches longues.	2
Tableau 2.8 : Indices de confort statique, de sécurité thermique et de confort dynamique de sous-vêtements à manches courtes.....	2
Tableau 2.9 : Indices de confort statique, de sécurité thermique et de confort dynamique de sous-vêtements à manches longues	2
Tableau 3.1 : Disposition des capteurs dans les différentes aires lors des deux phases.....	2
Tableau 3.2 : Températures moyennes mesurées sur le mannequin et en surface	2
Tableau 3.3 : Humidification des sous-vêtements	2
Tableau 3.4 : Températures maximales et flux thermiques moyens (mannequin, torse, abdomen).....	2
Tableau 4.1 : Niveaux de détermination du métabolisme énergétique (AFNOR/ISO 8996, 2004).....	2
Tableau 4.2 : Caractérisation de la charge physique au poste de travail (Warmé-Janville (b), 2003 ; AFNOR/ISO 8996, 2004)	2
Tableau 4.3 : Scénarios opérationnels simulés avec Predictol.....	2
Tableau 4.4 : Résultats de Prédicton pour les variantes 1 et 2.....	2
Tableau 4.5 : Résultats de Prédicton pour la variante 3	2
Tableau 4.6 : Caractéristiques biométriques des sujets.....	2
Tableau 4.6 : Moyenne des pertes de masses enregistrées.....	2
Tableau 5.1 : Durées limites moyennes d'exposition	2
Tableau 5.2 : Caractéristiques biométriques des sujets.....	2

LEXIQUE

ADH : Allo dix-huit
AFNOR : Association Française de NORmalisation
ARI : Appareil Respiratoire Isolant
BEG : Bureau d'Etudes Générales
BMPM : Bataillon des Marins-Pompiers de Marseille
BPAE : Bureau Prévention Enquête-Accident
BSPP : Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris
BOPE : Bureau OPérations
BIRP : Bureau Informations Relations Publiques
CEB : Centre d'Etudes du Bouchet (Essonne, France)
CEN : Comité Européen de Normalisation
CETIM : Centre Technique des Industries Mécaniques
CRSSA : Centre de Recherche du Service de Santé des Armées
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DDSC : Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles
DGA : Délégation Générale de l'Armement
DLE : Durée Limite d'Exposition
EPI : Equipement de Protection Individuelle
ETC : Centre Technique Européen de la société DuPont De Nemours
EMPA : Institut de recherche en science des matériaux et en technologie
HCCA : Habillement, Campement, Couchage, Ameublement
ISO (DIS) : Organisation Internationale de Normalisation
LCPP : Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris
LNE : Laboratoire National de métrologie et d'Essais
NRBC : Nucléaire, Radiologique, Biologique et Chimique
ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
Programme « FELIN » : Programme d'armement « Fantassin à Equipement et Liaison INTégrés ».
SAM : Specific Anthropomorphic Mannequin
SDIS : Service Départemental d'Incendie et de Secours
SIM : caisson de SIMulation à la maison du feu
SMU : Service Médical d'Urgence
STANAG : STANdardization AGreement (accord de normalisation)

Introduction générale

Il n'est pas un jour où l'actualité de la sécurité civile ne fasse la une des médias.

Allumez un poste de télévision et vous serez un témoin privilégié de l'action des services de secours qui portent assistance aux victimes d'un raz de marée ou d'un cyclone comme ceux observés en Asie et aux Etats-Unis en 2004 et en 2005. Il s'agit là, de la gestion de véritables crises humanitaires.

Vous verrez les soldats du feu lutter contre d'impressionnants incendies de forêts qui touchent chaque été la plupart des pays du bassin méditerranéen et qui, en plus des importants dégâts qu'ils occasionnent, provoquent régulièrement la mort en service de pompiers ou le crash d'avions bombardiers d'eau. En juillet 2005, quatorze pompiers forestiers ont ainsi été brûlés vifs lors d'un vaste brasier dans la province de Guadalajara, au centre de l'Espagne. Au Portugal, plus de 180 000 hectares de végétation ont été réduits en fumée ; dix pompiers ont péri dans les flammes et plus de cent trente ont été blessés. Plus de 4 240 km² de végétation soit plus de 4,5 % du territoire de ce pays avaient déjà été ravagés par les feux en 2003 en causant vingt morts. La France qui n'est pas épargnée par les accidents et les feux de forêt, aura vu en 2005, quatre avions bombardiers d'eau s'écraser ; cinq membres d'équipage périrent dans ces crashes. Depuis la création de cette unité de pompiers du ciel, il y a un demi-siècle, plus de trente pilotes ou copilotes ont perdu la vie en service commandé. A la fin des années 1940, 540 000 hectares de pins avaient été détruits dans les forêts landaises et en 1949, quatre-vingt-trois combattants volontaires du feu y furent mortellement brûlés. En 1952, suite à ces terribles incendies, le premier plan d'organisation générale des secours en cas de catastrophe (plan ORSEC) a été mis en place, conformément aux principes généraux de l'instruction interministérielle du 5 février 1952.

Les grandes capitales occidentales habituellement confrontées aux accidents de la vie courante, sont aujourd'hui touchées par un nouveau type d'agression. New York en 2001, Madrid en 2004 et Londres en juillet 2005 ont été successivement frappés par des attentats sauvages. L'Irak, l'Afghanistan et leurs pays voisins du Moyen-Orient sont quotidiennement le théâtre d'actes terroristes sanglants gratuits où les victimes se comptent par dizaines, voire par centaines.

Les effondrements des tours du World Trade Center, le 11 septembre 2001, auront à eux seuls englouti 343 *firefighters*. Depuis sa réorganisation en 1866, le *Fire Department of New York* n'avait connu de telles pertes au cours d'une même opération. (Dosne, 2002)

Dans la capitale française, les militaires de la Brigade de sapeurs-pompiers sont soumis depuis deux décennies à un taux de sollicitations opérationnelles de plus en plus important. Ce flux d'intervention, leur impose des drames au quotidien, comme par exemple pendant l'été 2005, où la capitale a connu une série d'incendies particulièrement tragiques faisant plus de cinquante morts dont plus de la moitié étant des enfants, et occasionnant de nombreux blessés. Les sinistres qui se sont déclarés de nuit, ont surpris les occupants des immeubles dans leur sommeil, les piégeant ainsi dans des constructions souvent vétustes, insalubres, délabrées et démunies de toute sécurité et générant parmi eux une panique souvent mortelle. Ils sont également confrontés à un nouveau type d'agression dans le cadre de violences urbaines. La banlieue nord aura été en novembre 2005, le théâtre d'une violence sans pareil avec pour la seule nuit du 9 novembre plus de 960 feux de véhicules, de poubelles et de bâtiments.

Si, les soldats du feu n'ont pas connu de perte et peu de blessures graves lors de ces derniers feux, l'année 2003 et surtout l'année 2002 auront été particulièrement dramatiques pour les sapeurs-pompiers de Paris.

En août 2003, pendant l'attaque d'un feu d'entrepôt désaffecté, un pignon du bâtiment s'effondre et ensevelit l'équipage du « premiers secours ». Deux militaires du corps, dont un personnel féminin, gravement blessés et brûlés seront rapidement dégagés, un troisième succombera à ses blessures (Decoloredo, 2003).

En septembre 2002, au cours de l'extinction d'un feu de « chambre de bonne » cinq sapeurs-pompiers de Paris sont terrassés et brûlés par une boule de feu, un phénomène thermique provoqué par un embrasement généralisé éclair (Fiévet, 2003 ; Michaelis, 2003).

En juillet 2000, la rupture d'une conduite de vapeur de chauffage urbain provoque une explosion qui tue le conducteur d'un engin pompe (Cantarel, 2000).

En août 1994, alors qu'il procédait à l'extinction d'un violent feu d'appartement dans l'est parisien, un gradé meurt électrocuté suite à la chute de conducteurs électriques sous tension sur les bouteilles métalliques de son appareil respiratoire isolant, en 1989, un militaire du corps avait déjà perdu la vie dans des conditions similaires.

Une étude sur « les sapeurs-pompiers face au courant électrique et à ses risques » avait apporté quelques propositions pour renforcer la sécurité des intervenants lorsqu'ils sont confrontés à des accidents d'origine électrique (Jacques, 1989).

Bien qu'encore incomplets, des recensements ont déjà permis d'identifier avec certitude mille-trois-cinquante-cinq sapeurs-pompiers communaux, soixante-seize militaires parisiens et quarante-neuf marins pompiers de Marseille, « morts au feu », entre 1852 et 1985 (Deville, 2002). En dix années (1992-2002), le tribut payé par les sapeurs-pompiers à la société est très lourd ; car si cent quatre-vingt-seize soldats du feu sont morts dans l'exécution de leur mission, plusieurs dizaines de milliers ont été blessés en opération pendant cette même période. A titre d'exemple, pour la seule année 2002, on comptabilise cinq mille cent quatre-vingt-douze accidentés en opération parmi les pompiers professionnels et volontaires français.

Mais au-delà de ces chiffres, qui laisseraient à croire que les sapeurs-pompiers ne se soucient guère de leur propre sécurité, une vaste réflexion est initiée par les instances en charge de la sécurité civile en France. Il s'agit, au regard de l'ensemble des accidents, d'étudier les missions confiées aux sapeurs-pompiers et de faire des propositions pour améliorer la sécurité active et passive des intervenants (Pourny, 2003).

A Paris, où la Brigade de Sapeurs-Pompiers dispose depuis 1971 d'un bureau d'études et de pilotage, un programme d'études sur la sécurité de ses personnels en intervention et tout particulièrement sur feu est lancé à la fin des années 1990, parallèlement à un vaste chantier de modernisation (Jacques (a), 2003).

La Brigade de sapeurs-pompiers de Paris, une unité atypique

L'organisation des secours dans la capitale et sa très proche banlieue relève du préfet de police de Paris et pour ce faire il dispose des moyens de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris (BSPP) (Arnaud, 1985 ; Cart-Taneur, 1986).

Cette unité militaire a été créée au début du 19^e siècle par décret impérial le 18 novembre 1811, pour pallier aux graves carences des gardes pompes de l'époque, notamment après le dramatique incendie de l'Ambassade d'Autriche où un bal avait été donné, par le Prince de Schwarzenberg, en l'honneur de l'Empereur Napoléon et de sa nouvelle épouse.

Par la suite, la structure et l'organisation des sapeurs-pompiers de Paris sont souvent liées à l'évolution de la ville ; ainsi en 1867 et après l'annexion des communes suburbaines à Paris, le bataillon est transformé en régiment et un siècle plus tard, le 1^{er} mars 1967, quelques temps après la réorganisation de la région parisienne et la création de nouveaux départements, le régiment devient brigade. Depuis cette époque, l'organisation opérationnelle repose sur trois groupements d'incendie, un groupement des services et un groupement instruction (Figure 1.1).



Figure 1.1 : Zone d'action de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris

L'évolution de ce Corps militaire ne se limite cependant pas à des organisations structurelles, et au milieu des années 1980, suite au transfert des activités de « police – secours » vers la brigade, d'importantes dispositions matérielles sont prises.

Nous entrons pour ainsi dire dans l'ère du « prompt-secours ». En effet, lorsqu'en 1985, les services de la police nationale se désengagèrent du « secours à victimes », le préfet de police de Paris confia cette mission aux sapeurs-pompiers parisiens.

Cela restera cependant, et contrairement aux attentes de la brigade, un transfert de charges sans véritables mesures externes d'accompagnement.

Pour absorber cette nouvelle mission, la brigade décida alors dans un premier temps, la mise en service d'engins polyvalents (Jacques, 1999), puis progressivement elle intégra des vecteurs associatifs dans son service de garde quotidien et enfin elle accentua le tri des appels afin de réorienter certaines demandes de dépannage « non-urgent » vers d'autres corps de métier.

Une variété d'interventions au service d'une population dense

L'étude de l'activité opérationnelle, chaque année plus conséquente avec une analyse affinée des risques liés au bassin parisien, renvoie inexorablement à la situation juridique de la brigade qui reste exceptionnelle et unique dans notre pays ; d'autant que ces particularités ne sont pas dénuées de conséquences.

La première d'entre elles relève de l'étendue et de la diversité de la zone de responsabilité de la brigade. Bien que celle-ci ne représente que 760 km², soit seulement 1/800^e de la superficie totale de la France métropolitaine, la population défendue équivaut à environ :

- six millions deux cent mille résidents c'est-à-dire, un peu plus de 10% de la population française ;
- plus de vingt-cinq millions de touristes qui visitent la « ville lumière » chaque année ;
- et environ deux millions de franciliens et provinciaux qui transitent chaque jour dans les transports en commun pour venir travailler dans la capitale.

Cœur institutionnel du pays, la zone de compétence de la brigade concentre la Présidence de la république, vingt-cinq ministères, l'Assemblée Nationale et le Sénat, cent trente ambassades, cinq préfectures et cent quarante quatre mairies. Centre culturel et administratif, elle abrite cent cinq musées, trois cents vingt écoles primaires, collèges et lycées, ainsi que de nombreuses universités. Carrefour de communications, le secteur de la brigade compte un hélicoptère et trois aéroports, Le Bourget, Roissy Charles-De-Gaulle et Orly, ainsi que six gares SNCF majeures et trois cent soixante-douze stations de métro et de RER. Centre économique enfin, on y dénombre plus de trois cent cinquante mille entreprises de toutes dimensions, quinze dépôts pétroliers ainsi que le plus grand marché alimentaire d'Europe : le marché d'intérêt national de Rungis.

La seconde de ces conséquences concerne l'organisation de la brigade. Seule unité interdépartementale, elle s'est attachée à développer un dispositif opérationnel lui permettant de garantir une efficacité optimale fondée à la fois sur une unité de doctrine et une unicité de commandement s'affranchissant des limites administratives des départements.

Sa zone d'action a ainsi été découpée en soixante-dix-sept secteurs opérationnels, chacun défendu par le personnel et les matériels d'un centre de secours, placé sous les ordres d'un sous-officier, chef de centre.

L'implantation de chacun de ces centres de secours a été définie en tenant compte de l'obligation d'intervenir en tout lieu dans les délais très brefs. Les centres de secours ont été regroupés en vingt-quatre compagnies d'incendie, chacune placée sous les ordres d'un capitaine, elles-mêmes regroupées en trois groupements opérationnels, à raison de huit par groupement, commandé par un lieutenant-colonel ou un colonel. Les moyens s'appuient mutuellement et sont coordonnés par un échelon central unique placé au niveau de l'état-major de la brigade. Cette organisation permet d'assurer la disponibilité immédiate, 24 heures sur 24, tous les jours de l'année, en tout point de la zone d'action de la brigade de plus de mille cinq cents sapeurs-pompiers de Paris.

Les effectifs de la brigade constituent également une des conséquences de cette situation : avec environ huit-mille hommes et femmes, elle forme l'unité de sapeurs-pompiers la plus importante de tout le pays.

En deux décennies, des changements au sein de la société sont constatés. L'urbanisation s'intensifie et de nouveaux risques apparaissent. Outre les interventions qualifiées d'usuelles telles que le « *secours à personnes* » et la « *lutte contre les feux* », les sapeurs-pompiers sont aujourd'hui confrontés à des accidents chimiques et technologiques, à des mouvements de foule lors de grands événements et depuis peu à des troubles urbains ; des dangers qui demandent des compétences particulières, des matériels adaptés et de nouvelles formations.

La notion d'urgence est elle-même transformée : la population très assistée exige une réponse rapide pour des interventions bénignes qui, hier encore, n'auraient pas suscité un appel à l'aide.

Néanmoins, pour le soldat du feu, l'incendie reste l'intervention majeure car c'est une opération au cours de laquelle il exprime un total savoir-faire. Combattre les flammes et soustraire une personne d'un péril imminent nécessitent une préparation minutieuse et permanente, car la moindre erreur ou le moindre retard est susceptible de mettre des vies en danger. De ce fait, l'exécution de la mission implique l'usage de matériels spécialement conçus. L'époque des véhicules hippomobiles du début du 20^e siècle est révolue, chaque équipement en service dans un engin ou utilisé par les sapeurs est développé pour garantir efficacité et sécurité.

Un volume d'interventions en constante augmentation

La zone de responsabilité de la brigade génère un volume d'interventions et une variété d'opérations sans commune mesure avec le restant des départements français.

Durant les dix huit dernières années, la brigade a connu un accroissement de ses interventions de plus de 70%, pour passer en 1986 de 264 711 interventions (BSPP-BOPE, 1987) à 428 458 en 2003, soit 1 173 interventions par jour (BSPP-BOPE, 2004).

Finalement, les raisons de ces évolutions, sur lesquels la brigade n'a pas de prise, tiennent à des paramètres à la fois d'ordre technique, comme l'essor considérable de la téléphonie mobile, d'ordre sociologique, avec en particulier le développement de la précarité, d'ordre juridique ou encore en raison du désengagement d'un certain nombre d'acteurs de la mission du « secours à victime » (médecins libéraux, ambulanciers privés...).

Des effectifs stagnants et des matériels opérationnels vieillissants

La sollicitation toujours plus importante de ses effectifs demeurés quasi-constants (environ 7 640 sapeurs-pompiers en 2002 contre 6 760 en 1985), et le vieillissement de ses matériels, génèrent des conséquences préjudiciables sur la capacité opérationnelle de l'unité, qui se trouve de ce fait fragilisée, tant dans son recrutement que dans la fidélisation de ses personnels.

Cette sollicitation est d'autant plus grande, que les effectifs de la brigade sont sous dimensionnés par rapport à la population défendue : elle présente le ratio le plus faible de France avec 1,1 sapeurs-pompiers pour 1000 habitants, contre 4,51 pour l'ensemble du territoire national.

Ce sous-dimensionnement se traduit par une charge de travail très importante, chaque sapeur-pompier assurant annuellement 135 gardes de 24 heures et 20 réserves opérationnelles de 10 heures, soit environ 90 heures de présence par semaine. Le temps passé sur une intervention, pendant une garde de 24 heures, s'est également « alourdi », pour passer de 22 minutes par heure en 1985 à plus de 45 minutes en 2002.

Du point de vue des matériels et des véhicules, la situation est également critique puisque l'accroissement du nombre de sorties d'engins, qui sont passées de 374 261 en 1985 à 533 806 en 2002 soit une hausse de plus de 42%, a été supporté par un parc à la fois modeste et vieillissant, avec pour conséquence un coût d'entretien et de maintenance élevé (la poursuite de l'utilisation de véhicules trop âgés devenant rapidement plus onéreuse que leur valeur vénale).

Une modernisation décidée par le gouvernement

Finalement, pour réguler toutes ces interventions et éviter une éventuelle dérive des missions, le commandement de la brigade fait le choix d'un recentrage de son cadre d'emploi. En 1996, un nouveau règlement relatif aux missions et à l'organisation de la BSPP, est proposé au Préfet de Police de Paris, son autorité de tutelle (décret 2000 - 1162 du 28 novembre 2000).

Dispersées dans différents textes souvent anciens, insuffisants dans certains domaines et parfois sujets à interprétation, les missions de la brigade nécessitaient d'être regroupées, complétées et précisées dans un instrument juridique unique, afin que son action puisse se développer dans un cadre réglementaire à la fois cohérent et clair.

Parallèlement à la promulgation de la loi sur l'organisation des services départementaux d'incendie et de secours (loi n°96-359 du 3 mai 1996, relative aux services d'incendie et de secours), la brigade présente donc un règlement ayant pour objet de répondre aux impératifs précités et de prendre en compte les évolutions intervenues ces dernières années dans le domaine de la sécurité civile et les textes qui y sont rattachés. Le 28 novembre 2000, un décret est publié au Journal Officiel pour pallier à l'insuffisance des textes antérieurs. Avec cette nouvelle norme, la brigade peut organiser sa professionnalisation, modifier ses principes de recrutement notamment en raison de la fin du service national et adapter l'emploi de ses moyens par rapport à l'évolution des sollicitations.

Vers une doctrine globale d'amélioration de la sécurité du sapeur-pompier en intervention

S'appuyant donc sur un cadre juridique rénové et juste, et en raison de la pression exercée par l'augmentation continue de ses activités depuis plus de deux décennies, la brigade lance dès les premiers jours du 21^e siècle, une réflexion pour moderniser ses moyens et ses modes d'action.

Pour conserver sa pleine capacité d'action opérationnelle tout en assumant les évolutions prévisibles dans les domaines complexes et variés du secours, un plan de modernisation a donc été arrêté sur la période 2002-2007, à l'initiative de l'Etat et en concertation avec la Ville de Paris et les collectivités locales des départements de la petite couronne (Proust, 2002).

L'amélioration des conditions de travail, la rénovation d'un parc de matériel, l'augmentation des capacités d'hébergement et la mise en service d'équipements nouveaux en sont les grandes lignes et le budget alloué à la concrétisation de cette modernisation s'élève à 73 millions d'euros avec un échelonnement sur la période 2002-2007.

Enfin, la mise en place du plan de modernisation est complétée par d'importantes mesures d'accompagnement, telles que la féminisation des unités opérationnelles élémentaires, la transmission informatisée des bilans médicaux depuis les lieux de l'intervention à la régularisation médicale, l'instauration de protocoles d'hygiène du « prompt-secours » et surtout la définition d'une doctrine globale visant à améliorer le niveau de maîtrise de la sécurité du sapeur-pompier en intervention et principalement lors de la lutte contre les feux.

Cette dernière mesure constitue un ensemble d'études spécifiques structuré en cinq modules. Les trois premiers modules qui font l'objet de travaux de recherches, portent successivement sur :

- l'analyse du retour d'expérience des interventions pour feux dans la capitale française ;
- l'historique et la mise au point de référentiels pour de nouvelles protections individuelles ;
- et la détermination d'une méthode de validation opérationnelle des nouveaux équipements avec des essais ergonomiques.

Les deux autres modules, non développés dans le présent document, intéressent la mise au point d'outils d'aide à la gestion de la reconnaissance opérationnelle et, l'élaboration de nouvelles manœuvres ou de nouveaux concepts d'intervention.

Si de récentes études (Hofmann et al., 2006, Hosser et al., 2006, Muller, 2006) sur le développement de la prévention contre les incendies mettent en évidence que l'extinction d'un feu reste un acte complexe et dangereux qui nécessite sans cesse un renouvellement des besoins opérationnels, l'amélioration et l'augmentation de la sécurité du pompier se traduisent très souvent et essentiellement par la mise au point de concepts opérationnels et de protections individuelles adaptés. Cependant, et bien que ces dernières soient conçues conformément à des référentiels techniques et à des standards européens, leurs limites d'emploi doivent être déterminées afin que les opérations de lutte contre le feu soient régulées en tenant compte des limites ergonomiques et physiologiques du porte-lance et non pas, comme c'est très souvent le cas par des barrières techniques des équipements et des matériels.

Pour les pompiers parisiens qui testent depuis le début de ce troisième millénaire de nouveaux équipements de protection individuelle (EPI), il ne s'agit plus seulement de rechercher la performance technique d'une lance à eau, d'un casque ou d'une tenue de protection, mais de définir les limites du cadre d'emploi du sapeur-pompier en intervention et ainsi de l'inclure dans **un concept global de sécurité** (Jacques (b), 2003).

Objectif du travail

Le sapeur pompier, un système d'attaque

Les progrès technologiques et les règlements arrêtés en application des directives européennes en matière de santé et de sécurité du travail (Daveau, 2006) permettent aux industriels qui créent des équipements pour pompiers, de concevoir des outils de travail évolués et performants et des matériels étudiés et modernes. L'évolution au plus près des flammes ou dans des gaz toxiques et chauds, impose au pompier le port d'une « armure en plusieurs couches ». Aujourd'hui, le porte-lance doit être équipé d'appareils sophistiqués de vision et de localisation, auxquels sont intégrés des capteurs capables d'analyser instantanément l'atmosphère ambiante et d'indiquer la valeur des températures rayonnantes. Pour garder une maîtrise de soi et ne pas se laisser envahir par l'émotion et le stress (Lavillunière, 2007), il doit rester relié à son entourage par une ligne de vie, afin de pouvoir échanger les données relevées sur le terrain. Enfin, pour se protéger des agressions thermiques, il doit disposer de moyens d'extinction sous la forme d'une propulsion d'eau sous pression alimentée à partir d'un réservoir.

Pour la brigade, ce professionnel équipé, entraîné est considéré comme un système complexe mais efficace. Ce soldat du feu du 21^e siècle, sera le fruit d'un programme d'études harmonisées intitulé : « **le sapeur-pompier, un système d'attaque** » (Jacques (b), 2003).

Assurer un niveau de protection au sapeur-pompier contre les risques identifiés implique inexorablement de les connaître et de les évaluer afin de les supprimer ou de les réduire à un niveau acceptable.

Si certains textes normatifs font état de méthodes pour y parvenir ou proposent un guide pour l'évaluation des risques (CEN, 1995), ce programme d'études doit permettre de finaliser pour les pompiers de Paris, les nouveaux besoins opérationnels en matière de protection individuelle. Il doit aussi permettre de fixer leur cadre d'emploi à partir de l'exploitation des enseignements tirés du retour d'expérience et recensés lors des incendies depuis de nombreuses années.

La compétence du Corps parisien en matière d'innovations techniques ainsi que son implication depuis de nombreuses années dans l'élaboration des règlements et des référentiels techniques et normatifs français et internationaux (Jacques, 1999), lui confère une grande maîtrise dans la conception, l'expérimentation et la mise au point d'équipements nouveaux.

De plus, et pour la première fois au niveau national, la mise en service de ces évolutions est précédée de tests ergonomiques réalisés directement avec des sujets « porte-lance » en laboratoire et dans un simulateur de feu, afin de définir les limites de l'emploi opérationnel des nouveaux matériels. Ce dernier point, est l'objet même de la présente étude.

Pour ce faire, la méthodologie mise en place s'est basée sur les grandes étapes successives et complémentaires (Jacques et al., 2004 ; Jacques et al. (f), 2005) décrites ci-après¹ :

- synthèse sur les activités opérationnelles des sapeurs-pompiers et leurs risques
- caractérisation des ensembles
- tenue au feu de ces mêmes ensembles vestimentaires
- simulations numériques de la charge thermique et essais préliminaires sur l'Homme en laboratoire
- essais à la maison à feu en conditions opérationnelles.

Après avoir énoncé les principaux risques auxquels le sapeur-pompier est confronté lors de la lutte contre l'incendie, le chapitre 1 présente. Les moyens de protection individuelle dont il dispose et leurs évolutions au cours des dernières décennies sont présentés. Les tenues et équipements choisis par la brigade et qui sont à valider y sont également détaillés.

Le chapitre 2 permet, sur la base de mesures ciblées (perméabilité à l'air, à la vapeur d'eau, isolement thermique,) de dresser un bilan des principales caractéristiques techniques et ergonomiques des ensembles vestimentaires d'intervention et de définir les propriétés fonctionnelles d'un nouveau sous-vêtement.

Ces mesures doivent être complétées par l'étude du comportement des tenues lorsqu'elles sont soumises à un flux thermique représentatif des conditions opérationnelles.

Ainsi, le chapitre 3 présente les résultats des essais de tenue au feu des équipements soumis à des flux thermiques modérés (5kW et 10kW) et à un flash thermique.

¹ Lors de ces travaux, le comportement du porte-lance dans une ambiance froide n'est pas analysé.

Le chapitre 4 se divise en deux parties : des simulations numériques et des tests sur l'Homme en laboratoire. Conforme au champ d'application de la loi « Huriet-Sérusclat », la première partie du chapitre 4 porte sur la simulation de la charge de travail équivalente à deux scénarios réalisés, l'un en laboratoire ergonomique, l'autre à la maison du feu, par un pompier aux mensurations standardisées, à l'aide de logiciels de calcul.

La deuxième partie du chapitre 4 se déroule en laboratoire, le sapeur-pompier équipé des tenues à valider doit réaliser, dans une ambiance thermique neutre, un certain nombre d'exercices sur un tapis roulant motorisé. Ses principaux paramètres physiologiques sont mesurés.

Cette étape a pour objectif, tout en s'appuyant sur les enseignements de nombreux travaux réalisés avec des porteurs d'ARI en laboratoire (Julien et al., 1991 ; Medelli, et Fullana, 1995 ; Medelli et al., 1996 ; Rancurel, 1998 ; Medelli, et Fullana, 2002 ; Reungoat et al., 2005), soit de confirmer les résultats obtenus par la simulation, soit de mesurer et de valider d'autres limites physiologiques atteintes par le pompier lors de l'exécution de ces mêmes exercices.

Enfin, le chapitre 5 détaille les essais réalisés sur le plateau technique de la maison du feu.

Lors de ceux-ci le sapeur-pompier équipé des différentes tenues est confronté à un incendie en conditions réelles. Pendant les tests avec les équipements de l'ancienne et de la nouvelle génération (Stemmelen et Cantarel, 2001 ; Cheval, 2005), des mesures complémentaires sont réalisées avec les évolutions de sous-vêtements, de sur-pantalon, de cagoule et de gant en textile dont la mise au point a été poursuivie tout au long du cycle d'études.

De nouvelles perspectives dont la doctrine d'emploi des moyens et des équipements de protection individuelle viennent conclure ces travaux.

Chapitre 1.

Les risques et les équipements de protection liés aux interventions de lutte contre l'incendie

-
- 1.1. L'activité opérationnelle des pompiers en France
 - 1.2. L'incendie et ses dangers
 - 1.3. Les équipements de protection individuelle
-

Après avoir dressé un bilan sur l'activité opérationnelle des sapeurs-pompiers en France, la première partie se focalise plus précisément sur les dangers liés aux interventions de lutte contre le feu. Une deuxième partie présente ensuite, les évolutions des équipements de protection individuelle utilisés dans la lutte contre l'incendie.

1.1. L'activité opérationnelle des pompiers en France et les dangers du métier de sapeur-pompier

1.1.1. Un métier diversifié aux risques variés

1.1.1.1. Des tâches multiples

Depuis plus d'une dizaine d'années, les sapeurs-pompiers français sont amenés à intervenir en moyenne quotidiennement 10 000 fois pour du « secours à victime », des incendies, des accidents liés à la circulation et pour diverses autres demandes de secours, selon les proportions moyennes présentées par la figure 1.2.

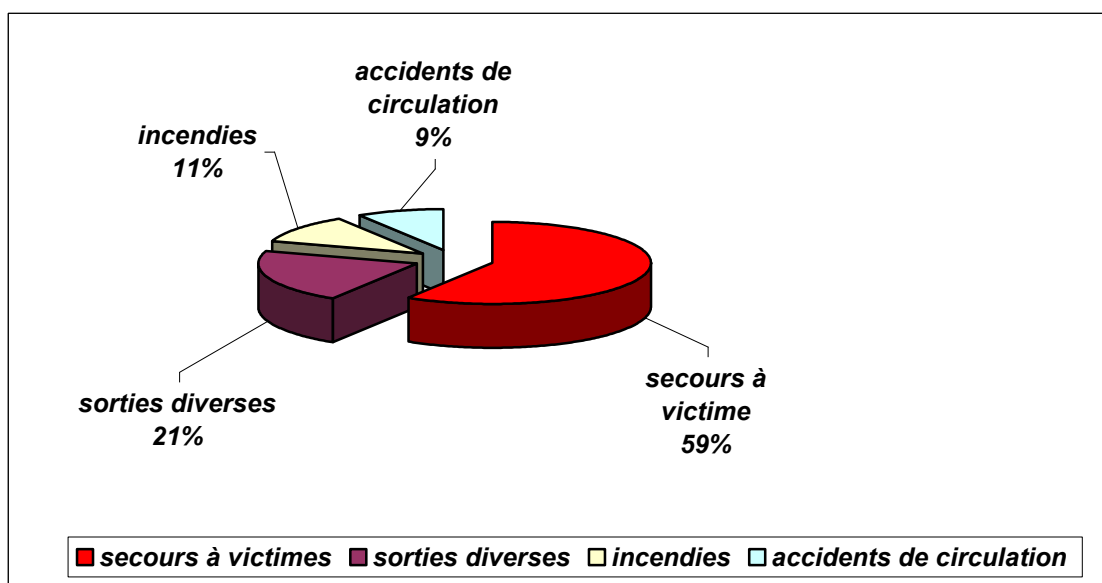


Figure 1.2 : Répartition des activités opérationnelles des sapeurs-pompiers en France (DDSC, 2004)

Cette répartition de l'activité opérationnelle qui est comparable à celle de l'activité de la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris, met en évidence que les missions traitées sont des plus variées. On relève par exemple, qu'en 2002, près de 71% des interventions ont été dédiées aux secours à victimes et à l'assistance aux personnes en difficultés, 10% aux reconnaissances, 6% aux accidents de la circulation, 5% à des interventions relevant des risques technologiques, 5% aux incendies, le reste à des opérations diverses.

Nous assistons là, depuis près d'une décennie, pour les sapeurs-pompiers français, à un véritable transfert de missions.

Car, si les compétences premières du soldat du feu étaient la maîtrise des techniques de lutte contre l'incendie, elles sont aujourd'hui essentiellement tournées vers le prompt-secours et les techniques du secourisme avec la maîtrise d'outils comme le défibrillateur semi-automatique dont les premiers appareils ont été expérimentés puis mis en service par les pompiers de Paris en 1992 (Richter, Lienhard, Fuilla, 1992).

L'apparition de nouveaux risques, notamment ceux liés aux activités industrielles et surtout les menaces d'hyper terrorisme comme on a déjà pu le constater avec les attentats qui ont frappé le métro de Tokyo, les Twin Towers et le ministère américain de la défense ainsi que les moyens de transports des capitales espagnole et anglaise, obligent les services d'urgence à augmenter leur champ de compétence en se spécialisant dans des domaines tels que les risques nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques (NRBC) (Brushlinski et al., 2005), (Jacques, 2006).

Si l'on se recentre sur la zone d'action de la brigade, on relève que depuis le début des années 1990, les militaires parisiens traitent quotidiennement entre 1000 et 1250 missions opérationnelles (BSPP-BOPE, 2004). Parmi elles, 78% le sont en moins d'une heure et 98% en moins de deux heures, comme le montre la figure 1.3.

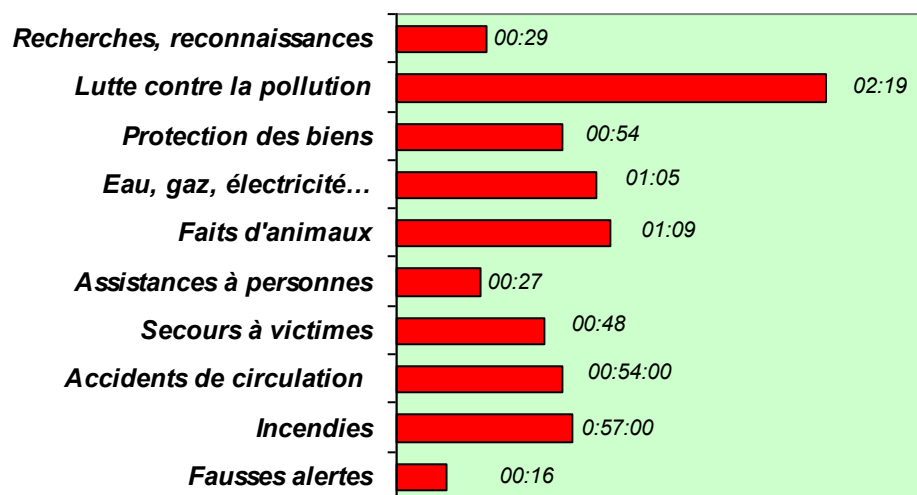


Figure 1.3 : Durée moyenne des interventions en 2003 (BSPP-BOPE, 2004)

En affinant ces chiffres établis à partir des rapports d'intervention où il apparaît qu'en moyenne les interventions courantes sont traitées en moins d'une heure, l'on remarquera que celles qui concentrent les secours le plus longtemps relèvent surtout de la lutte contre la pollution. L'intervention de prompt secours qui est l'activité dominante est généralement traitée en 48 minutes et la majorité des incendies (cf. Figure 1.3) est en moyenne éteinte en moins d'une heure, lorsqu'ils ne nécessitent pas de déblaiement et de dégarnissage importants.

Ces différentes activités opérationnelles génèrent un certain nombre de dangers et d'accidents très particuliers au métier de sapeurs-pompiers.

1.1.1.2. Les risques du métier

Au niveau national, les bureaux de la sécurité civile publient depuis le milieu des années 1980 des statistiques concernant les sapeurs-pompiers volontaires et professionnels, relatives aux accidents en service, avec les arrêts de travail et les décès comme le présente la figure 1.4 (Abbadie, 1974 ; De Pompelonne (a), 1990 ; De Pompelonne et al. (b), 1990). Cependant, ces chiffres restent trop généraux et très peu exploités (Prim, 1982 ; Prim, 1987 ; Zenhacker, et Levy, 1988 ; Prim, 1989 ; DDSC, 2005).

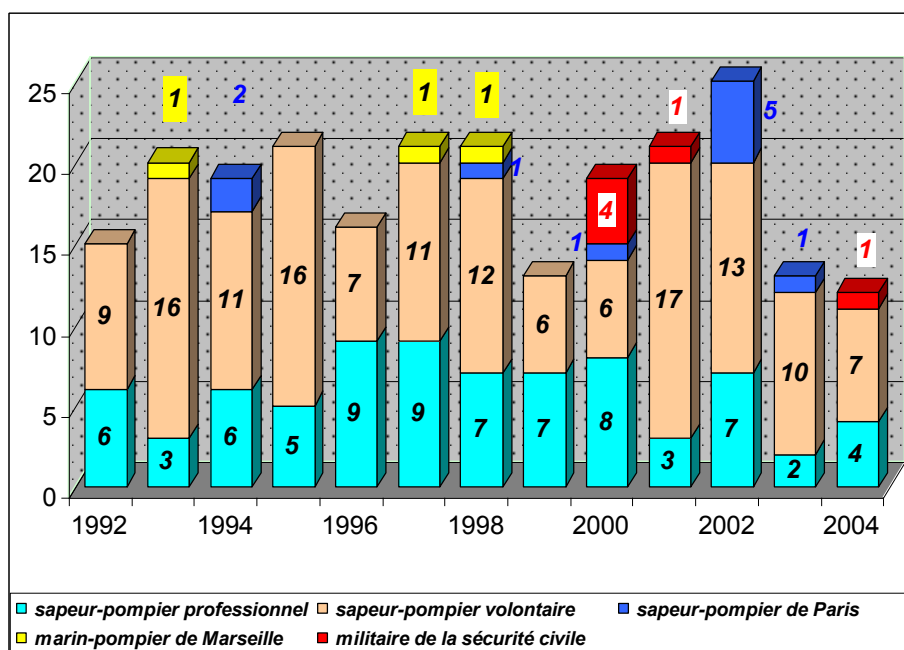


Figure 1.4 : Décès en service (DDSC, 2005)

Ainsi, par exemple pour l'année 2004, le ministère de la sécurité civile se contente simplement de classer les décès en service comme ayant eu lieu lors d'activités opérationnelles, sur le trajet menant à l'intervention, à la suite d'un malaise sur les lieux d'une intervention, pendant un entraînement et encore au cours d'un accident de circulation non lié à une intervention sans en détailler les circonstances ou les enseignements qui en sont tirés. Pour pallier ce manque d'exploitation et à la demande des sapeurs-pompiers, la direction de la défense et de la sécurité civiles crée le 1^{er} août 2004, un bureau prévention accidents-enquêtes (BPAE) avec pour objectifs l'amélioration de la culture de sécurité au sein des services de secours à partir du retour d'expérience.

Pour les accidents non mortels liés au service, les informations sont un peu plus fournies. L'exploitation des statistiques (Figures 1.5 et 1.6), laisse apparaître d'une manière générale que trois accidents sur quatre sont soit dus à la pratique d'une activité sportive, soit à l'opération. Par contre, si chez les pompiers professionnels, près d'un accident sur deux (47%) est lié à un sport et un accident sur quatre à l'intervention (25%), les proportions sont inversées lorsqu'on se reporte à l'accidentologie relative aux pompiers volontaires (47% des accidents sont liés aux opérations, 13% aux manœuvres et 21% aux activités sportives) (DDSC, 2005).

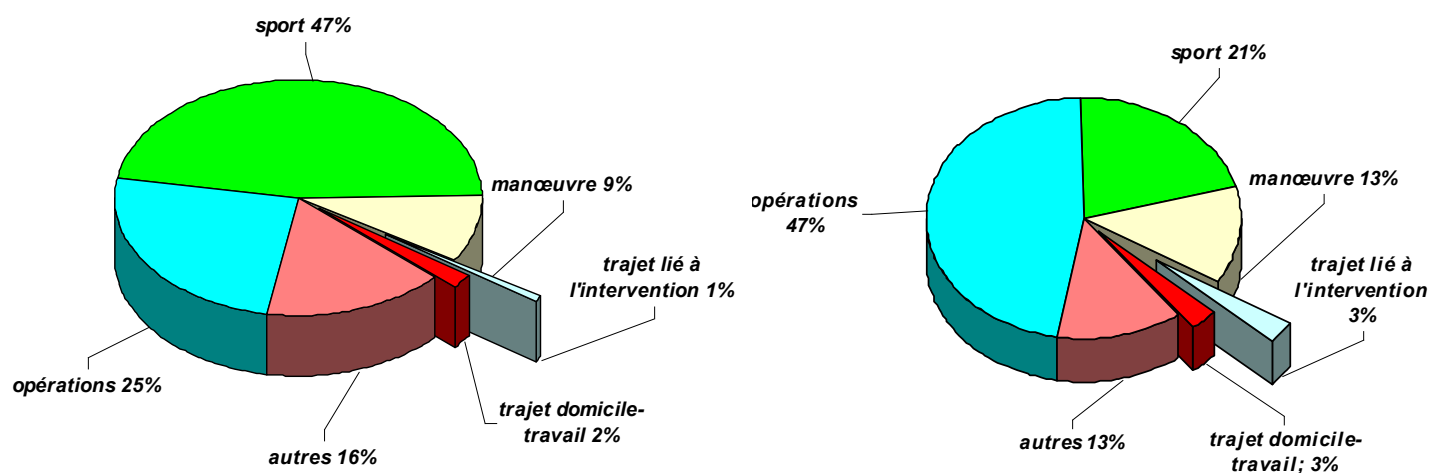


Figure 1.5 : Accidents en service des sapeurs-pompiers professionnels (DDSC, 2005)

Figure 1.6 : Accidents en service des sapeurs-pompiers volontaires (DDSC, 2005)

Une étude sur la causalité des accidents à la brigade réalisée en 2002, à partir de 1 421 cas, donne des résultats similaires à ceux publiés par la Sécurité Civile (Cardilès, 2003). Plus de 40 % des blessures sont relatives à la pratique d'un sport et environ 30 %, soit 420 atteintes physiques, se produisent pendant les interventions. Parmi celles-ci, 190 sont consécutives au sauvetage d'une personne ou à l'extinction d'un feu. L'ensemble de ces accidents représente près de 20 000 journées de travail perdues, soit 2% des jours travaillés par ses personnels. Cela correspond également à l'indisponibilité d'un effectif de 135 militaires pendant une année.

Si les circonstances des accidents sont connues et sont très souvent dues à la pratique d'activités sportives, cette dernière, reste néanmoins essentielle car elle permet aux pompiers d'entretenir une condition physique nécessaire à l'exercice de leur métier.

Aussi, la réflexion menée à la brigade a davantage contribué à la validation de sports adaptés et surtout à la réduction de la pratique d'exercices de cohésion ou de loisirs, tels bon nombre de jeux collectifs qui provoquent à eux seuls plus de la moitié des atteintes corporelles.

A Paris, il s'avère que la fréquence des blessures semble aussi liée au rythme de travail et au régime de gardes. En effet, avec une durée hebdomadaire de gardes opérationnelles supérieure à 65 heures et un taux de sollicitation élevé de jour comme de nuit, le pompier de Paris est susceptible de présenter une fatigue latente dont les incidences influenceront tôt ou tard sur la capacité opérationnelle.

1.1.2. Les dangers d'un incendie

Pour être plus exhaustif sur les accidents en intervention, de nombreuses analyses spécifiques réalisées depuis plusieurs années à partir des incendies traités dans la capitale (BSPP-BOPE, de 1977 à 2004) ont permis de mettre en évidence les dangers du feu. Une base de données a ainsi pu être établie grâce au suivi quotidien de l'activité opérationnelle et à l'enregistrement des caractéristiques de chaque sinistre traité.

Ces caractéristiques relevées et les investigations menées par des laboratoires scientifiques comme par exemple le Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) de Paris ou le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) aident à la compréhension des problèmes générés par de nombreux incendies en facilitant l'étude des risques encourus par le porte-lance.

1.1.2.1. La problématique des feux

Le problème des incendies n'est certes pas nouveau (Dosne, 2004 ; Hascoet et al., 2006), il reste toujours d'actualité et des catastrophes humaines dues au feu sont là pour nous le rappeler périodiquement.

Le feu de l'Opéra Comique à Paris en mai 1887, avec 115 morts ; le feu du bazar de la charité à Paris, en 1897, avec 130 morts dont la plupart était des femmes ; le feu des nouvelles galeries de Marseille en 1938, avec 75 décédés ; le feu du cinéma « Le Sélect » en 1947 à Rueil-Malmaison avec 89 victimes ou encore la catastrophe du dancing « le Cinq-Sept » en Isère où 146 jeunes périrent des suites d'émanations de vapeurs toxiques provenant de la décomposition de décors en polystyrène et autres matériaux synthétiques (Borgé et Viasnoff ; 1995), sont autant de drames qui ont contribué à l'évolution des règles de construction et d'aménagement.

Si ces catastrophes pour ne citer qu'elles, concernent d'abord les usagers de ces lieux publics, il n'en demeure pas moins vrai que le pompier, malgré les progrès de la prévention et les avancées réalisées en matière de sécurité du travail, reste exposé à une multitude de risques lorsqu'il combat le feu. Des recherches pour définir les dangers encourus par les soldats du feu, puis pour les réduire, ont bien été menées ces dernières années dans le monde (Giguère, 1995 ; Von Björn Lüssenheide, 2003), mais, l'accidentologie spécifique à l'attaque du feu reste encore très limitée en France (Pourny, 2003).

L'étude des statistiques opérationnelles relatives aux interventions dans la capitale et en particulier celles qui intéressent les incendies (BSPP-BOPE, 2004 et 2005(a)), permet de dresser de nombreux constats.

Le volume et la nature des interventions effectuées par les pompiers, les différents paramètres spécifiques aux incendies ainsi que les différents types d'atteintes corporelles subies par les soldats du feu, notamment les brûlures, permettent une meilleure appréciation des risques opérationnels et des mesures de protection qui en découlent. Ainsi, parmi les interventions conventionnelles, ce sont les opérations de lutte contre le feu et les explosions (Fuilla et al. 2000 ; Noto, 2000) qui génèrent pour les pompiers les dangers les plus importants.

Bien que ne représentant qu'un peu moins de 5% du total des interventions, on comptabilise tout de même chaque année entre 17 000 et 20 000 incendies dans la capitale (BSPP-BOPE, 2004 et 2005(a)). Cette cinquantaine de feux par jour occasionne les blessures les plus importantes chez les intervenants qui, tout en disposant de protections spécifiques, restent confrontés aux mêmes dangers pendant l'exécution de leur mission que ceux qui menacent les occupants des volumes sinistrés. En espaces clos ou semi confinés, ce sont les phénomènes thermiques qui sont le plus redoutés pendant la lutte contre le feu (Garrigues et al., 2003).

A l'air libre, les risques sont différents. Lorsque l'incendie concerne un véhicule, c'est l'explosion d'un réservoir de gaz de pétrole liquéfié qui est le plus à craindre. En 1999, à Vénissieux (69), le dysfonctionnement d'une soupape de sécurité sur un réservoir de carburant avait occasionné la blessure de six pompiers, l'un d'entre eux s'étant même vu arracher la jambe.

Enfin, les risques de société ne doivent pas être négligés, ainsi, pendant la période des troubles urbains en banlieue parisienne, entre le 27 octobre 2005 et le 15 novembre 2005, les pompiers de Paris ont été confrontés à 1 477 feux de poubelles, 3 392 feux de véhicules et 588 incendies de bâtiments, avec 962 incendies pour la seule nuit du 5 au 6 novembre 2005.

Treize pompiers ont été blessés ou brûlés, cinquante six engins d'interventions ont été dégradés et deux centres de secours ont été attaqués, lors de cette période d'incivilités envers les secours de la brigade (Audoin et Le Goff, 2005).

La figure 1.7 qui présente la répartition annuelle des incendies sur 24 heures, met en évidence que plus de la moitié des feux se déclare entre 20 heures et 8 heures du matin, et de manière plus précise on comptabilise quotidiennement une quinzaine de feux en moyenne entre 20 heures et 1 heure du matin. Ces sinistres sont très souvent dus à des accidents domestiques (BSPP-BOPE, 2004).

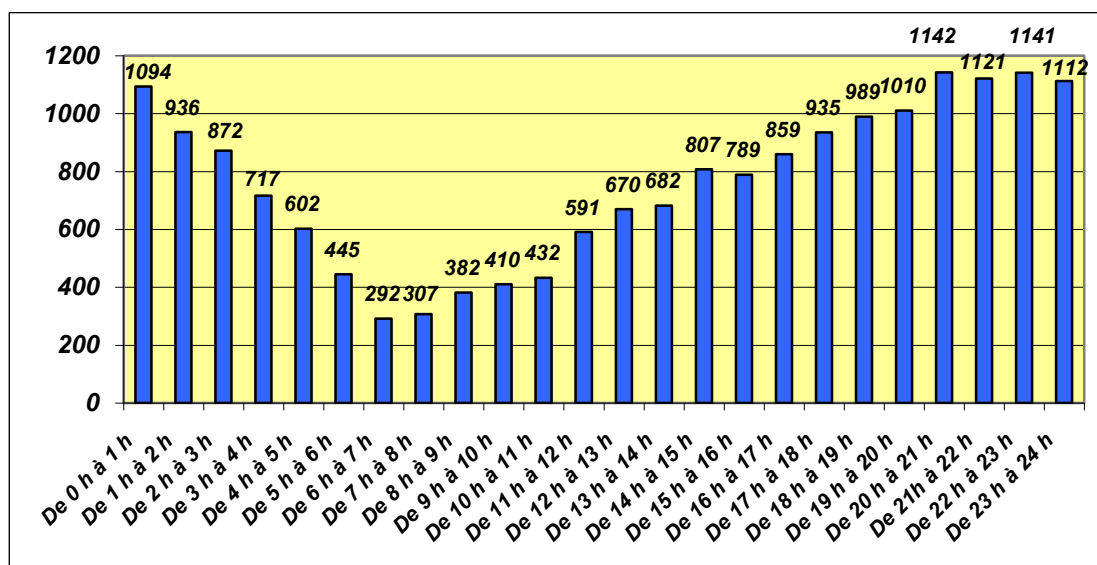


Figure 1.7 : Répartition des incendies dans la journée en 2003 (BSPP-BOPE, 2004)

Par ailleurs, il s'avère que les sinistres qui se déclarent la nuit dans les locaux d'habitations, pendant le sommeil des occupants, provoquent le plus grand nombre de victimes (Lehot et al., 1999 ; Galerne 2005).

A partir de la figure 1.8, qui détaille la durée de l'extinction d'un feu, on observe qu'environ 73% des incendies sont traités en moins d'une heure, 18% entre une et deux heures et 8% d'entre eux nécessitent plus de deux heures d'intervention active de la part des secours. En région parisienne, les secours sont essentiellement confrontés à des feux urbains ; les feux de zones boisées ou d'espaces naturels qui peuvent durer plusieurs jours, sont plus rares.

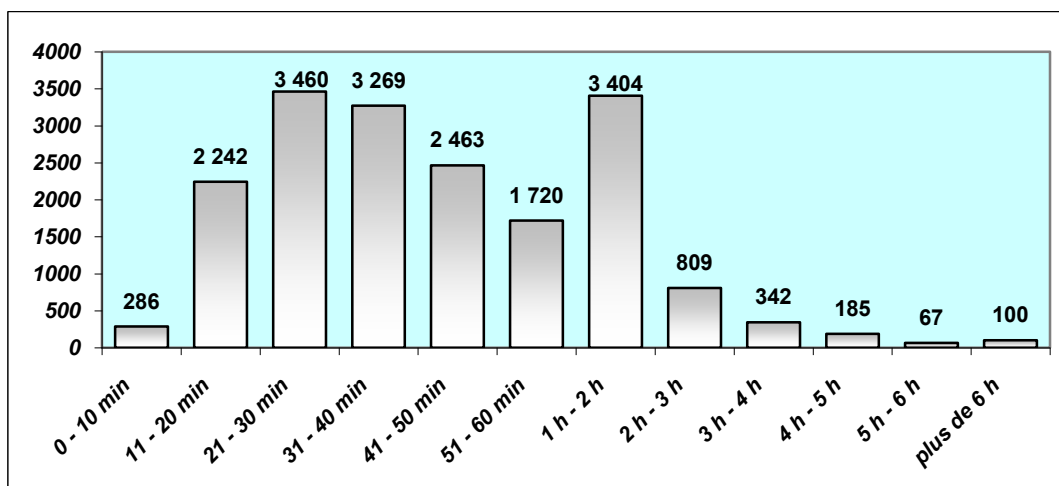


Figure 1.8 : Temps passé sur feux en 2003 (BSPP-BOPE, 2004)

Malgré les efforts réalisés dans le domaine de la prévention contre les incendies, 40% d'entre eux concernent les locaux d'habitations, cela représente annuellement dans la capitale française entre 7 500 et 8 000 sinistres. Des analyses approfondies de ces interventions dans le cadre d'une collaboration active entre les pompiers et le LCPP de Paris permettent de conclure que l'électricité, le dysfonctionnement des appareils et les flammes nues sont fréquemment à l'origine de ces feux.

Obtenue à partir du retour d'expérience, la figure 1.9 présente une répartition du feu en fonction de sa nature et de son aliment principal. Dans 39% des cas, les matériaux en cause sont composés de cellulose tels que le bois, les tissus ou le papier (classe A); dans 20 % des cas, ils sont à base de peintures, plastiques et dérivés.

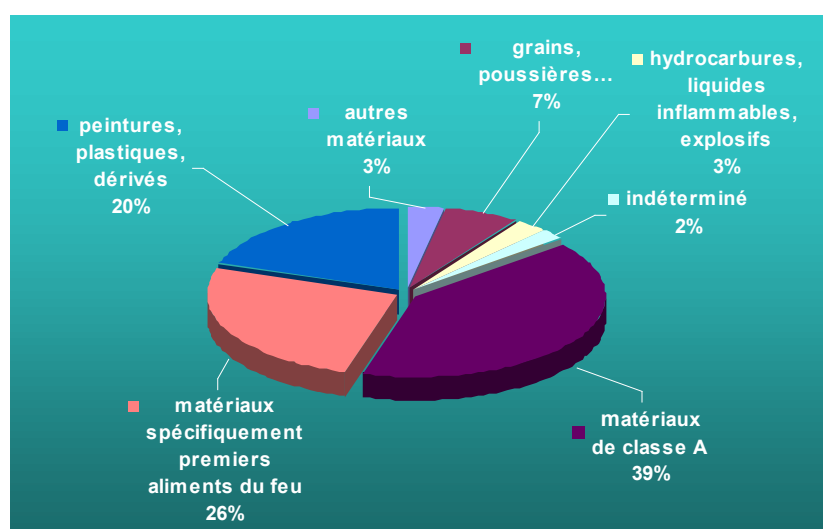


Figure 1.9 : Répartition des incendies en fonction de la nature du feu et de l'aliment principal (BSPP-BOPE, 2004)

La multiplicité de ces aliments et le mélange des produits de décomposition lors d'une combustion génèrent des résidus toxiques variés et occasionnent souvent de nombreuses victimes (Schmauch (a) et (b), 2001). On relève ainsi, que 1 740 personnes ont été des victimes directes ou indirectes d'un incendie dans la capitale en 2003.

Sur la base de la figure 1.10 qui représente d'une manière générale les atteintes physiques des victimes des incendies dans Paris et sa proche banlieue, on constate que 67 % d'entre elles sont intoxiquées par les fumées ou les gaz chauds, environ 17 % présentent des brûlures et un peu moins de 2 % sont carbonisés.

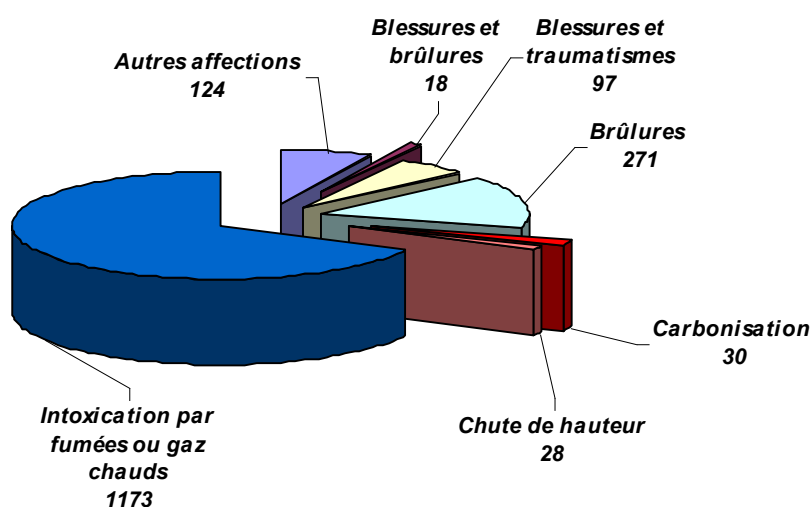


Figure 1.10 : Répartition des affections touchant les victimes d'incendie (BSPP-BOPE, 2005)

Cette importante proportion de décès par intoxication, qui se répète sensiblement d'année en année depuis plusieurs décennies, suscite toujours beaucoup d'intérêt et régulièrement de nouvelles études sont lancées afin de permettre aux intervenants et aux usagers de mieux appréhender les dangers liés aux gaz de combustion et aux fumées (Commissariat à l'Energie Atomique et GIMAEX, 2007).

1.1.2.2. Le caractère dangereux des fumées et des gaz chauds

L'utilisation de matériaux d'origine synthétique dans les constructions et les aménagements des logements étant depuis plusieurs décennies de plus en plus courante, les occupants sont confrontés à une très forte augmentation des risques encourus en cas d'incendie, en raison des forts potentiels calorifiques et des atmosphères particulièrement toxiques formées lors de la décomposition thermique de ces matériaux (Baud, 1999 ; Becker, 2002).

C'est ainsi que, si dans un incendie, les flammes constituent le phénomène le plus spectaculaire ; la brûlure ayant longtemps été la seule conséquence redoutée, depuis le milieu des années 1980, l'analyse des causes de décès des victimes d'incendie a permis d'associer au risque thermique, le risque traumatique à la suite d'une explosion ou d'une défenestration, et surtout le risque chimique avec la toxicité des produits de dégradation thermique des matériaux.

En complément aux relevés annuels des activités opérationnelles de la brigade, plusieurs études statistiques ont clairement montré que 80 % des décès sur feu, dans le monde, seraient secondaires à la toxicité des fumées (Birky et Clarke, 1981 ; Muraz-Moscicki et Morin, 1998) feux d'habitation étant à l'origine de la majorité des victimes (Mierley et Baker, 1983).

Au cours d'un incendie, le danger présenté par un matériau est lié essentiellement à trois facteurs principaux :

- le comportement au feu du matériau dont dépendront la facilité d'inflammation, la vitesse de propagation de l'incendie et la température de l'environnement ;
- la densité des fumées émises dont dépendront les facilités d'intervention des secours et les possibilités d'évacuation des victimes ;
- la toxicité des gaz émis durant l'incendie dont dépendront les possibilités de survie et de guérison sans séquelles des victimes.

Les deux premiers sont des facteurs physico-chimiques de la dégradation thermique des matériaux. Ils ont été étudiés et ont fait l'objet de normes nationales et internationales (DDSC, 2003).

Par contre, en ce qui concerne l'évaluation de la toxicité des produits de thermolyse des matériaux, le problème reste entier et les recherches dans ce domaine sont moins avancées.

Au début des années 1990, plusieurs travaux (Guerbet et al., 1991) ont été menés au laboratoire de toxicologie et de physique de l'université de Rouen afin de définir une méthode prédictive d'évaluation de la toxicité des produits de thermolyse. Si l'effet toxique des différents composés pris individuellement est assez bien connu, il est en revanche souvent difficile, voire impossible, de déduire d'une analyse chimique, plus ou moins complète, la toxicité de ces gaz de combustion car ils sont toujours constitués par des mélanges plus ou moins complexes et en proportions variables. Des phénomènes de synergie ou d'antagonisme entre ces composés risquent donc de contredire toute prédiction de toxicité faite à partir des seuls résultats analytiques.

C'est la raison pour laquelle, les physiciens et les toxicologues de l'université de Rouen ont estimé qu'une étude analytique, aussi complète soit-elle, restait insuffisante pour évaluer la toxicité des produits de thermolyse qui ne pouvait être appréciée que par une étude biologique sur l'animal.

Les travaux menés par le service médical d'urgence de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris sur la « gestion médicale des intoxications par les fumées d'incendie en infrastructure » à partir d'analyses réalisées sur des victimes décédées lors d'incendies (Rüttimann et al., 2003), confirment plusieurs études antérieures menées sur la toxicité des fumées d'incendie (Anderson, 1986). Plus de 150 molécules différentes ont été isolées dans le sang des victimes décédées. Néanmoins, s'il est difficile de répertorier la totalité des composants des fumées d'incendie, de très nombreux produits sont retrouvés par des études expérimentales de la dégradation thermique des matériaux (Kimura et al. 1988). Il s'agit le plus souvent d'une poly-intoxication provoquée par des composés que l'on peut regrouper en deux grandes classes toxicologiques : les dépresseurs du système nerveux central ou anoxiants qui sont responsables d'une toxicité systémique et, les irritants ou suffocants qui sont responsables d'une atteinte pulmonaire (Garnier et al., 1990).

En ce qui concerne la toxicité pour l'organisme, la déplétion en oxygène et l'émission de dioxyde d'azote en grande quantité jouent un rôle important par l'incapacitation et l'hyperventilation qu'elles entraînent respectivement. Le monoxyde de carbone (CO) dont la quantité produite dépend largement des conditions d'oxygénation du feu, majeure également, par son effet incapacitant la gravité de l'intoxication (Hartzell, 1989). La formation de carboxyhémoglobine diminue le transport de l'oxygène ; il existe donc une toxicité directe du CO au niveau cellulaire (Fein et al. 1980). L'acide cyanhydrique (HCN), dégagé lors de la pyrolyse de différents matériaux modernes, en particulier, les polyuréthanes et le polyacrylonitrile a une action toxicodynamique sur le cerveau et le cœur (Thomas et O'Flaherty, 1979). De plus, les intoxications au monoxyde de carbone et à l'acide cyanhydrique ont des effets additifs sinon synergiques (Baud et al., 1988). A ces produits, il faut ajouter les oxydes d'azote et les composés soufrés comme l'hydrogène sulfuré. De nombreux autres produits comme les composés organiques volatiles (benzène, nitrométhane, acétate d'éthyle) ont été récemment impliqués dans la mortalité des victimes d'incendie (Houeto et al., 1997).

A ces actions sur l'organisme s'ajoute l'action des gaz ou vapeurs irritants entraînant une irritation initiale et les brûlures caustiques secondaires à tous les niveaux de l'arbre respiratoire (Garnier, Chataigner, Efthymiou, 1990).

Ce sont les aldéhydes, tels l'acroléine et le formaldéhyde, les acides minéraux comme l'acide chlorhydrique, l'acide fluorhydrique et le phosgène, les oxydes d'azote, l'ammoniac, les anhydres comme l'anhydre sulfureux et enfin les suies, responsables à la fois d'un empoussiérage important de l'arbre aérien et de brûlures caustiques (Carsin et al., 1990). Par ailleurs, la vapeur d'eau, du fait de sa conductibilité thermique provoque de véritables brûlures thermiques (Carsin et al., 1995).

Une très récente étude bibliographique sur les « effets du feu sur les personnes » menée par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) dans le cadre du Projet National Ingénierie de la Sécurité Incendie (Guillaume, 2006) relève que les risques liés au feu sur les personnes exposées sont essentiellement de trois natures :

- la perte de visibilité : elle retarde l'évacuation, désoriente les foules et peut les exposer plus longtemps ou de manière plus importante aux autres effets ;
- les risques thermiques liés au feu et aux fumées : ils peuvent entraîner une incapacitation ou une létalité au sein des populations. Ils sont liés au flux thermique et à la température ;
- les risques toxiques du feu : ils sont engendrés par les espèces chimiques présentes dans les fumées, et sont les plus importants. Ils sont incapacitants ou létaux, parfois à des distances considérables des foyers.

A ces facteurs s'ajoute le risque de développement rapide et incontrôlable du feu par flash over. Le risque pour les personnes dépend alors des trois critères suscités, mais le principal danger vient de l'étape rapide que constitue l'embrasement généralisé dans l'incendie. D'autres effets sur les personnes peuvent s'ajouter, comme l'anoxie liée au manque d'oxygène et les risques d'étouffement dus à la présence de particules de suies (Guillaume, 2006).

En résumé, l'intoxication par les fumées d'incendie conduit par ses différentes composantes à une cascade hypoxique, à partir de l'atmosphère ambiante jusqu'au métabolisme cellulaire par baisse de pression partielle en oxygène, obstruction, bronchospasme, œdème lésionnel, diminution du transport de l'oxygène et enfin blocage de l'utilisation cellulaire de l'oxygène (Barriot et Riou, 1999).

Ces spécificités sur les dangers des gaz de combustion et la toxicité des fumées d'incendie, ne doivent pas faire oublier que les soldats du feu sont très souvent les premiers concernés par ces risques (Le Blanc et Fahy, 2002).

En 1995, lors d'une réflexion sur les contributions possibles de l'ergonomie à l'amélioration de la sécurité du travail des pompiers au Canada, plus de 1 000 titres d'articles issus de périodiques scientifiques et généraux traitant de « santé et sécurité des pompiers » ont été recensés (Giguère, 1995). Si un nombre important de titres traite de la toxicité, lors de la combustion, ou dégagée par des produits chimiques, les titres les plus pertinents portent sur les contraintes et astreintes physiques et physiologiques du travail de pompier, sur les risques d'accidents et à la santé et enfin, sur les outils et équipements.

1.1.2.3. Le risque de brûlure

Il est fréquemment observé que les brûlures qui sont causées par le rayonnement thermique, les flammes, les fumées ou les vapeurs, sont localisées à la tête (Figure 1.11).



Figure 1.11 : Brûlures aux oreilles (photo BSPP)

Les irritations qui sont dues aux fumées, aux produits chimiques ou encore aux corps étrangers touchent principalement les yeux et les poumons. La visibilité réduite par la présence des flammes et des fumées au cours de l'extinction, notamment à l'intérieur des bâtiments, est une des contraintes environnementales typiques de ces situations accidentelles. Bien que les défaillances des protections individuelles (casque, visière, cache oreilles, gants, tenue d'attaque) ne soient que rarement mentionnées dans les rapports circonstanciés des interventions, des préconisations et des recommandations ciblent néanmoins ces équipements, afin qu'ils soient sensiblement améliorés (Champoux et Cloutier, 1996 ; Fortin, 2001 ; Fortin 2003).

Dès le lancement des premières réflexions sur la mise au point des nouvelles protections vestimentaires, le service médical d'urgence de la brigade débuta une étude épidémiologique sur les brûlures du sapeur-pompier de Paris en intervention (Fortin et al., 2001 ; Fortin et al., 2004). Ainsi, entre 1998 et 2003, 149 militaires du corps ont été traités et suivis.

Les critères analysés et qui se réfèrent à l'âge des sujets, à la surface, à la profondeur et à la localisation de la brûlure ainsi qu'au type d'agent vulnérant, contribuent à l'évaluation de la gravité des brûlures. Toutefois, c'est une pondération de ces différents facteurs qui permet l'établissement d'indices de gravité et ainsi une classification simple des patients par rapport aux risques encourus (vitaux et non vitaux) et le type de prise en charge. Ce dernier point a fait l'objet d'une étude médicale (Burlaton, 2004).

L'âge du patient :

L'âge du patient est un élément déterminant du pronostic vital car il influe sur les capacités de cicatrisation et la défense contre les infections (Wassermann, 1999).

Un classement par tranche d'âge laisse apparaître que 87 % des victimes traitées ont moins de trente ans (Figure 1.12), il s'agit pour l'essentiel de pompiers qui occupent la fonction opérationnelle de porte-lance, et donc celle où il est directement confronté aux effets thermiques et aux évolutions du feu.

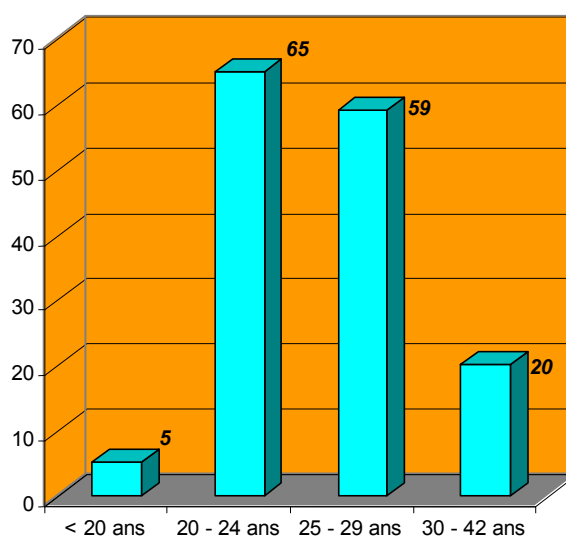


Figure 1.12 : Nombre de brûlés par tranche d'âge (BSPP-SMU, 2004)

Peu de pathologies présentent une étendue de gravité aussi large que celle des brûlures, ce qui rend les domaines de comparaison entre la petite brûlure domestique à laquelle personne n'échappe au cours de sa vie et la brûlure profonde qui atteint la quasi-totalité du revêtement cutané, d'autant plus difficiles. La brûlure profonde représente l'un des traumatismes les plus lourds auxquels il est possible d'être confronté (Wassermann, 1999).

La Surface Corporelle Brûlée (SCB) :

Pour 83 % de ces brûlés, les plaies recouvrent moins de 10 % de la surface cutanée ; 8 % des sujets présentent des atteintes sur plus de 20 % du corps et pour le restant, les plaies s'étendent sur une surface comprise entre 10 et 20 % de la surface corporelle. La surface de la brûlure est évaluée en pourcentage de la surface corporelle totale. Pour les atteintes peu étendues, l'évaluation est réalisée en tenant compte du fait qu'une paume (il s'agit de la paume de la main de la victime) représente environ 1 % de la surface corporelle totale.

La règle des neuf (règle de Wallace) (Burlaton, 2004) qui a l'avantage d'être facile à mémoriser permet une évaluation rapide des brûlures étendues : elle attribue des multiples de 9 % de la surface corporelle totale à différents territoires cutanés (9 % pour l'extrémité céphalique, 9 % pour chaque membre supérieur, 18 % pour chaque membre inférieur, 18 % pour chaque face du tronc, 1 % pour le périnée). Toutefois, cette règle reste imprécise et ignore les variations morphologiques en rapport avec l'âge. Une évaluation rigoureuse n'est possible qu'en ayant recours à des tables plus détaillées qui tiennent compte de l'âge, telles les tables de Berkow ou de Lund et Browder (Burlaton, 2004).

Toutefois, même réalisée par des spécialistes, l'estimation de la surface de brûlure reste très variable, elle nécessite une attention particulière et l'aide d'un schéma.

La profondeur de brûlure :

La profondeur de brûlure se mesure généralement en degrés (Wassermann, 1999) :

- le premier degré correspond à une atteinte des couches superficielles de l'épiderme sans lésion de la basale. Il se reconnaît à l'absence de décollement (pas de phlyctène) et à la présence d'un érythème douloureux ;
- le deuxième degré superficiel correspond à une lésion de la quasi-totalité de l'épiderme y compris une partie de la basale. Sur le plan morphologique, il se reconnaît par la présence constante de phlyctènes dont le plancher, après excision, est rouge, bien vascularisé et très sensible ;
- le deuxième degré profond est une destruction complète de l'épiderme et du derme superficiel. Ne persistent intacts que le derme profond et les annexes épidermiques (poils, glandes sudoripares et sébacées).

Ces brûlures présentent comme celles du deuxième degré superficiel, des phlyctènes mais, après excision, le plancher de celles-ci apparaît blanc-rosé, mal vascularisé, peu sensible ;

- le troisième degré correspond à une destruction totale de la peau incluant, au minimum, la totalité de l'épiderme et du derme. Il se présente comme une nécrose cutanée adhérente, sans phlyctène, de couleur plus ou moins foncée (allant du blanc au noir en passant par le marron), avec perte totale de sensibilité.

Toutefois, cette classification n'est pas aisée à la phase initiale des lésions. Il est donc préférable de distinguer les brûlures superficielles ou partielles (atteintes seulement épidermiques d'évolution spontanément et rapidement favorable) et celles profondes ou totales (dermo-épidermiques, très longues à cicatriser nécessitant le recours à la chirurgie). En pratique, toute brûlure qui n'a pas un aspect typique de coup de soleil doit être considérée comme une lésion profonde (Wassermann, 1999).

Dans les brûlures thermiques, la profondeur dépend d'une part de la température atteinte sur la surface cutanée et, d'autre part, de la durée de l'exposition à cette température. Par exemple, lors de l'immersion dans de l'eau chaude, une brûlure au troisième degré est provoquée en deux secondes à 65 °C, dix secondes à 60°C et en trente secondes à 54°C.

Les diagnostics réalisés révèlent que les brûlures des pompiers sont dans la majorité des cas, peu profondes. C'est ainsi que pour 89% des victimes, les atteintes restent superficielles, seuls vingt sujets présentent des brûlures profondes (Figure 1.13).

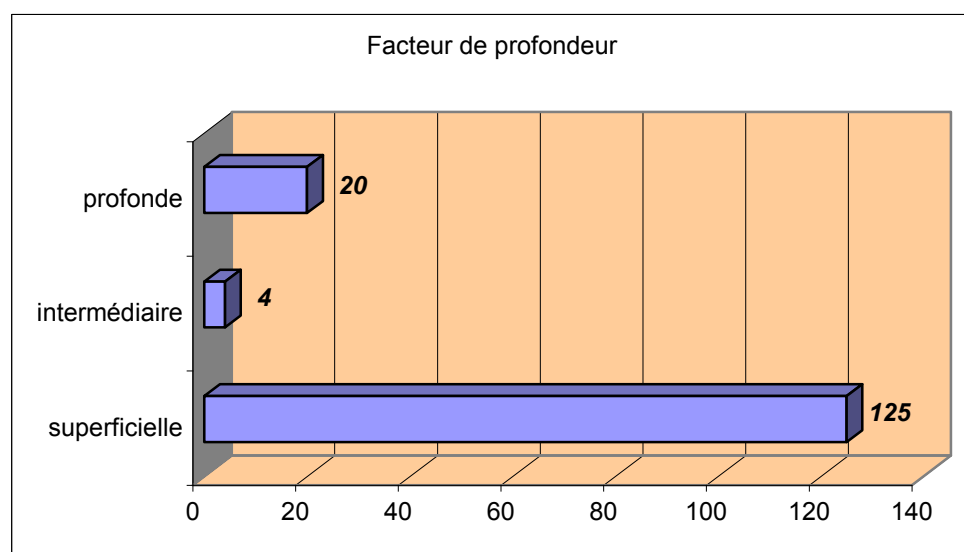


Figure 1.13 : Facteur de profondeur (BSPP-SMU, 2004)

La localisation des brûlures :

La prise en compte de ces cent quarante-neuf patients au cours de ces six années, a permis de recenser cinq cent quatorze brûlures différentes (Figure 1.14).

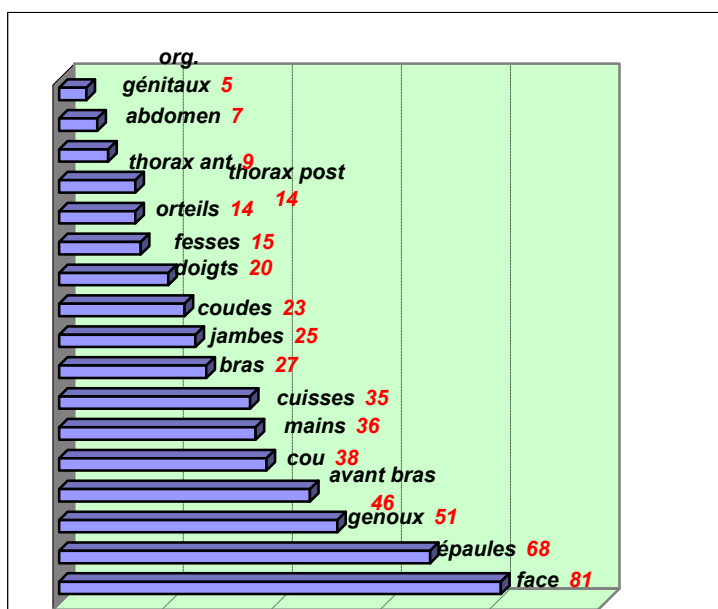


Figure 1.14 : Nombre de brûlures par localisation (Fortin et al., 2004)

Les brûlures du visage (Figure 1.15) sont particulièrement défavorables. Cette localisation est évocatrice d'une lésion d'inhalation de fumée.

Elle peut entraîner, en raison de la formation rapide d'un œdème, une détresse respiratoire aiguë (Burlaton, 2004). Elle peut laisser persister, en cas de lésions profondes, des cicatrices dont les conséquences psychosociologiques sont majeures. (Rio, 1994 ; Le Bars, 2004).

Pourtant, avec quatre-vingt-une localisations de brûlures, la tête est la partie du corps la plus touchée (Fortin, 2003) et ce malgré la protection apportée par le casque F1 et le masque de l'appareil respiratoire isolant.

L'analyse de la gravité de ces lésions révèle cependant que la grande majorité d'entre-elles, soit 80 %, restent bénignes et se situent plus précisément à l'emplacement de la jugulaire et aux oreilles.



Figure 1.15 : Brûlures au cou et à la face (Photo BSPP)

Pour les autres, le niveau de gravité est plus important car elles sont essentiellement dues au retrait du masque de l'ARI en phase de stress intense, à l'absence du port du masque de l'ARI, ou encore à l'oubli du rabat de l'écran thermique.

Généralement, les performances de tenue au feu du casque F1 permettent au porte-lance d'intervenir pendant environ douze minutes dans une ambiance thermique proche de $450 \pm 10^{\circ}\text{C}$. Cette durée peut être prolongée sous certaines conditions de ventilation et d'attaque des volumes en feu, car la réflexion du rayonnement thermique sur la surface nickelée et la couche d'air située entre la tête et la calotte réduisent la perception du flux thermique (Letourneur (a), 2005).

D'autres indicateurs de températures ont été déterminés, ainsi des tests de réaction au feu des matériaux utilisés ont démontré qu'un choc thermique sur le casque du à un écart de température instantané de 25°C à 500°C provoquait le décollage du nickelage. Ou encore qu'une température rayonnée d'environ 180°C provoquait une altération de la partie translucide de l'écran de protection thermique (CEN, 1997 ; DDSC, 2002).

Enfin, pour compléter l'analyse des brûlures du visage, il convient d'y associer toutes les lésions touchant le cou. Trente-huit brûlures y ont été localisées, mais elles sont généralement peu graves. Longtemps protégée par une cravate de feu, cette partie du corps est aujourd'hui couverte par un tour de cou composé pour 50% en aramide et pour 50% de laine. Sous l'effet de la chaleur et suivant le taux de transpiration, le tour devient désagréable à porter et provoque de nombreuses irritations.

Pour réduire et limiter les brûlures à la tête et au cou qui représentent 22% des brûlures totales, la décision de doter les personnels de la brigade d'une cagoule est prise en 2001. Cet effet fera partie des équipements de nouvelle génération.

Utilisée depuis plus de quinze ans par les marins-pompiers de Marseille et de la marine nationale, notamment pendant l'attaque de feux en espaces confinés comme les cales des navires, la cagoule assure une protection individuelle en recouvrant parfaitement le cou et une grande partie du visage. De plus, son efficacité est confirmée par les utilisateurs du bataillon de marins-pompiers de Marseille (BMPM), où entre 1994 et 1999, seulement deux brûlures sérieuses ont été observées sur ces parties du corps.

Les brûlures des mains, très fréquentes puisqu'elles représentent 7% des lésions, peuvent entraîner des séquelles fonctionnelles et esthétiques particulièrement handicapantes. Aussi, suite à la mise en évidence par des essais (Filteau et Shao, 1999), de la très mauvaise tenue au feu du gant en cuir lorsqu'il est en contact avec la flamme ou soumis à un fort rayonnement, son remplacement par une nouvelle protection en textile est validée. Les caractéristiques techniques de ces nouvelles protections des mains seront définies ultérieurement après une campagne d'essais ergonomiques.

Le recensement de l'ensemble de ces brûlures permet d'en faire une répartition affinée, ainsi 42% des brûlures sont localisées aux membres supérieurs, 25% aux membres inférieurs, 23% à la face et au cou et 10% sur le tronc.

Avec plus de soixante-cinq brûlures, les épaules représentent l'une des parties du corps les plus atteintes par les agressions du feu. Ces brûlures sont liées au port de l'appareil de protection respiratoire qui écrase les différentes couches d'air entre les différents vêtements portés par le porte-lance.

Les brûlures aux genoux qui concernent environ 10% des lésions, sont dues au contact de l'articulation avec le revêtement de sol surchauffé. Cette brûlure, essentiellement par conduction, est une incidence de la position accroupie adoptée par le porte-lance lors de l'attaque du feu. Généralement, les brûlures des jambes et des pieds contraignent le sujet au décubitus et l'expose ainsi au risque thrombo-embolique (Burlaton, 2004). Enfin, les brûlures du siège qui restent limitées, augmentent le risque infectieux.

L'ensemble des facteurs permet donc d'établir une classification de la gravité d'une brûlure en quatre niveaux (Wassermann, 1999) :

- brûlures bénignes :

Il s'agit de lésions peu étendues (moins de 2% de la surface corporelle), du premier et du deuxième degré superficiel, ne touchant ni la face, ni le siège, ni les mains ;

- brûlures de gravité intermédiaire :

Elles correspondent soit à des brûlures peu étendues mais profondes ou localisées au niveau du visage, du siège ou des mains, soit à des brûlures dont l'étendue dépasse 2% de la surface corporelle mais reste inférieure à 10% de celle-ci. Il n'existe pas de lésions respiratoires (pas d'inhalation de fumée) ni de risques particuliers ;

- brûlures graves :

Il s'agit de brûlures dont l'étendue (entre 15 et 50% de la surface corporelle) et la profondeur (deuxième et troisième degrés) entraînent un risque vital, risque qui peut aussi être le fait de lésions pulmonaires par inhalation de fumées, d'un blast (explosion de gaz), de l'origine de la brûlure (brûlures électriques, brûlures chimiques), d'un traumatisme associé ou d'un terrain débilisé ;

- brûlures très graves :

Ces brûlures sont en majorité profondes et leur surface dépasse 50% de la surface corporelle. Les risques vitaux sont majeurs pour ces brûlures qui ne peuvent évoluer favorablement que si l'on utilise toutes les ressources thérapeutiques modernes.

Toutefois, dans la pratique, la gravité d'une brûlure ne doit pas seulement tenir compte du pronostic vital, mais intégrer les risques de séquelles, de complications diverses, les difficultés particulières de la mise en œuvre des traitements sont autant d'éléments qui doivent intervenir dans la classification.

Enfin, le recensement des brûlures en opération a permis d'établir deux ratios intitulés taux d'incidence moyen des brûlures, l'un par rapport au nombre d'incendies traités et l'autre par rapport à l'effectif de la brigade.

Ainsi, comme le présente la figure 1.16, le taux d'incidence moyen des brûlures entre 1996 et 2003, est de 34,2 pour 10 000 incendies (Fortin et al., 2004).

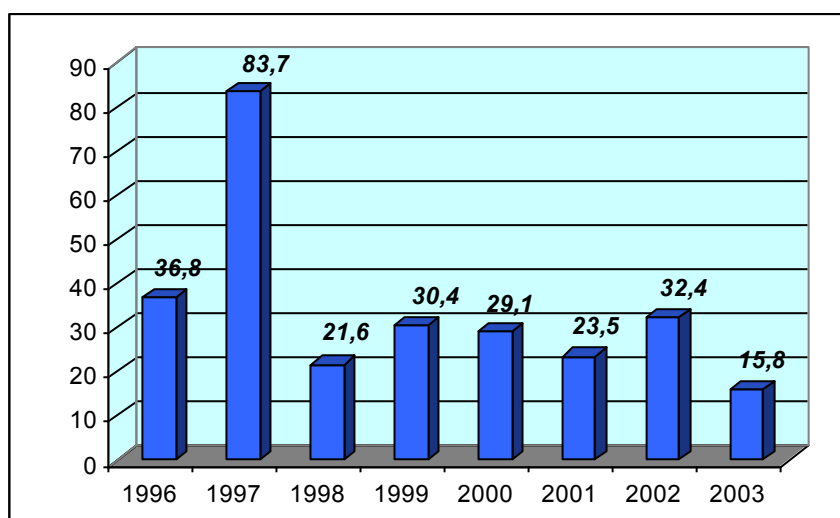


Figure 1.16 : Taux d'incidence (%) des brûlures par année et rapport au nombre des incendies traités (Fortin et al., 2004)

Et comme présenté par la figure 1.17, le taux d'indice moyen des brûlures entre 1996 et 2003, est de 8,3 pour 1 000 sapeurs-pompiers.

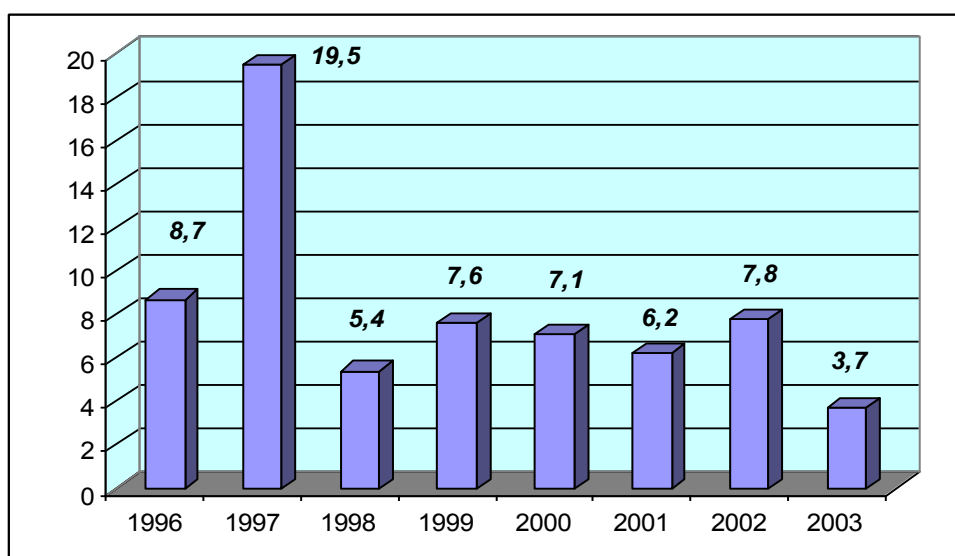


Figure 1.17 : Taux d'incidence (%) des brûlures par année et rapport à l'effectif de la brigade (Fortin et al., 2004)

1.1.2.4. Les contraintes et les astreintes physiques et physiologiques des sapeurs pompiers lors d'une intervention sur feu

En 1992, une réflexion menée au Québec (Champoux et Cloutier, 1996), à partir de 1 041 accidents du travail impliquant des pompiers de deux grandes municipalités, a permis de catégoriser les accidents en plusieurs classes.

L'analyse circonstancielle de chacun d'eux a mis en évidence que 22% des accidents sont des traumatismes légers, des contusions ou des coupures, 20% sont consécutifs à une chute ou une glissade dans les escaliers ou à partir d'une échelle, 18% sont liés au départ ou au retour d'intervention, comme une chute de la « perche de feu », 13% sont des brûlures et des irritations après un contact avec une substance chaude, un produit chimique, 12% découlent de mauvaises manœuvres des outils destinés à l'extinction du feu, 11% sont liés au travail de force en hauteur, avec le maniement de masse ou de hachette, enfin 4% sont d'origines diverses.

Bien que les différences d'organisation des services d'incendie et de secours européens et nord-américains soient avérées, elles le sont d'ailleurs également entre la brigade et les établissements publics départementaux français chargés de l'organisation des secours (SDIS), les études nord-américaines telles que précitées, sont souvent les seules références bibliographiques en la matière. En France et dans la plupart des pays européens, la littérature ne fait que ponctuellement état de travaux spécifiques et très souvent, la brigade attire la plus grande attention en raison de ses particularités décrites précédemment.

Depuis le milieu des années 1990, le suivi des pompiers accidentés y est plus affiné : chaque situation accidentelle fait l'objet d'analyses spécifiques et les conclusions sont exploitées pour être communiquées sous forme de notes opérationnelles à l'ensemble des intervenants.

Si l'on considère les seules atteintes physiques relevant d'opérations de lutte contre les incendies comme présentées par la figure 1.18, et sans faire état de la nature et de la gravité de ces blessures qui seront détaillées dans les paragraphes suivants, on relève que la brigade enregistre un blessé, un intoxiqué ou un brûlé toutes les 32 heures (BSPP-BOPE, 2005) ; des statistiques, bien que non affinées confirment à cet effet le caractère astreignant et parfois dangereux du métier (Noto, 1984).

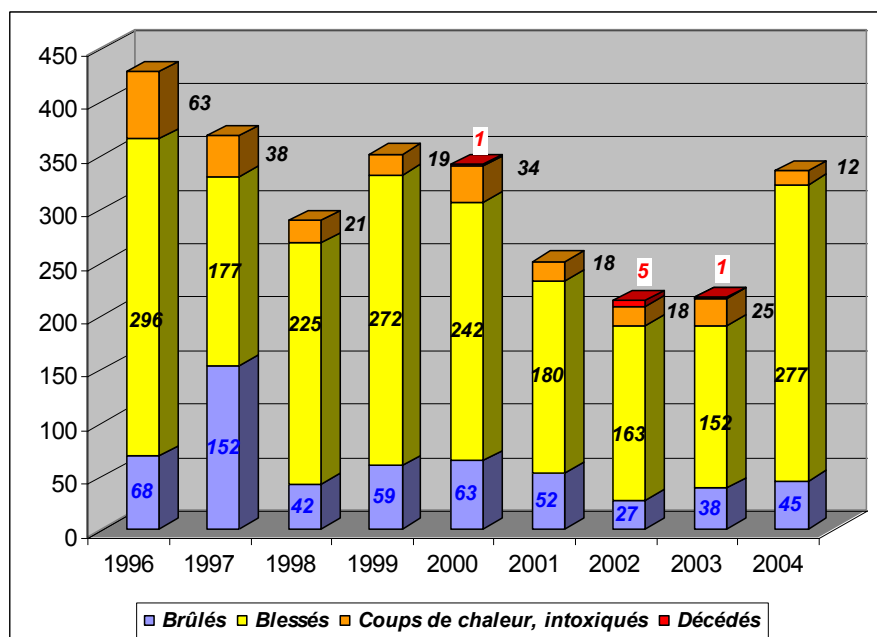


Figure 1.18 : Accidentologie sur feu à la BSPP (BSPP-BOPE, 2005)

1.1.2.5. Les troubles musculo-squelettiques

Une étude complémentaire à la réflexion de 1992, sur les accidents en intervention des pompiers dans deux grandes agglomérations du Québec (Champoux et Cloutier, 1996) a été conduite avec sept services d'incendie canadiens. Elle indique que les efforts physiques effectués par les pompiers en opération peuvent être la cause de lombalgies et d'accidents musculo-squelettiques notamment suite à la manutention de matériels et d'équipements lourds lors de l'accès et de la descente des véhicules de lutte contre l'incendie (Giguère et Marchand, 2002).

L'analyse des déplacements avec des charges, le stress biomécanique sur les membres inférieurs lorsqu'un pompier descend du véhicule et les effets de la manutention des outils et des équipements sur le rachis lombaire ont permis d'établir de nombreuses préconisations ergonomiques avec de nouvelles répartitions des charges de certains équipements et un réaménagement des camions de lutte contre l'incendie (Giguère, Balleux et Marchand, 2001).

Ces travaux canadiens confirment par ailleurs, les conclusions d'une étude médicale (Genin, 1986) conduite en 1985, avec les médecins de la brigade, et qui signalait que les lésions les plus fréquentes parmi les pompiers de Paris, étaient les entorses avec environ 38% de l'ensemble des accidents enregistrés. Ces atteintes physiques touchaient surtout les membres inférieurs et cela dans 59% des cas, lors de l'entraînement et dans 23% des cas au cours d'interventions.

1.1.2.6. Le stress physique et psychologique du pompier

D'autres études (Soccorsi, 1986 ; Guenec, 1987 ; Le Gall et Michel, 1997 ; Ruttiman, 2000) mettent également en évidence que les exigences de travail sollicitent beaucoup le système cardiovasculaire, notamment en ambiance chaude. D'autant que, les contraintes sur le soldat du feu sont aggravées par le poids des outils et les équipements de protection thermique et respiratoire. La charge physique est souvent proche des capacités maximales, ce qui explique un nombre élevé d'accidents cardiaques chez les pompiers. Ces informations sont d'ailleurs, à l'origine des tests d'évaluation de la condition physique et de sélection à l'embauche. Enfin, il est de plus en plus admis que la combinaison d'efforts physiques importants et du stress émotionnel lors de sauvetage de personne ou pendant la lutte contre les flammes a une incidence sur les problèmes cardiaques (Dublin et al., 1947 ; DéCouflé et al., 1977 ; Kuorinka et Korhonen, 1981 ; Feuer et Roseman, 1986 ; Noto, 1989 ; Nivet et al., 1989 ; Neveux-Huben, 1997 ; Lavillunière, 2007).

1.1.2.7. Les intoxications lors des déblaiements

A la suite de plusieurs recensements de cancers chez les pompiers de Montréal une évaluation des risques de tumeurs cérébrales, de tumeurs du rein et de tumeurs de la vessie a été réalisée pour des sujets ayant plus de vingt années d'ancienneté et exposés aux contaminants (Douglas et McGégor, 2005). De telles atteintes seraient liées à l'exposition des pompiers aux gaz de pyrolyse ou de combustion incomplète et aux fumées résiduelles qui continuent leur diffusion pendant les opérations de dégarnissage et de déblai. Car, bien que disposant d'un appareil de protection respiratoire, il semblerait que les pompiers utilisent peu leur équipement pendant la durée de l'incendie.

Pour un feu de bâtiment, cette durée est estimée à 50% du temps total passé à combattre le sinistre, et pour tous les autres types de feu, cette durée n'est que de 6% du temps total (Austin et al., 2001(a)(b)(c)).

En effet, et cela est également le cas à Paris, l'appareil de protection respiratoire isolant dont le poids varie de 14 kg à 18 kg selon le modèle (Ben Mohamed, 1998), est porté pendant les reconnaissances en présence de fumées et pendant l'attaque du foyer ; rarement pour un feu couvant ou lorsque le foyer est considéré comme éteint.

Or, il s'avère que lors du dégarnissage des parties calcinées, des concentrations significatives de plusieurs substances toxiques, comme par exemple le monoxyde de carbone ou le benzène, sont encore présentes dans l'atmosphère sur les lieux des incendies et provoquent des intoxications chroniques des soldats du feu (Bolstad-Johnson et al., 2000 ; Brandt-Rauf et al. 1988).

Depuis 1978, plusieurs recherches différentes (Musk et al., 1978 ; Eliopoulos et al., 1984 ; Grimes et al., 1991 ; Giles et al., 1993) ont été réalisées dans le monde, sur la relation entre l'exposition professionnelle des pompiers et les différents cancers.

Certains travaux présentent cependant des résultats contradictoires et pour un bon nombre de cas de décès, la relation entre les doses perçues et les effets ressentis n'est pas significative. Une réflexion menée sur 830 sapeurs-pompiers de Paris, ayant au moins servi pendant cinq années à la brigade, entre 1977 et 1991, a révélé 18 cas de décès suite à un cancer (Deschamps et al., 1995). Toutefois, le rapport de risque d'un cancer, lié au travail, pour un pompier de Paris reste largement inférieur à celui d'un échantillon similaire d'ouvriers de l'industrie.

Par contre, une étude européenne (Fuilla, 1992) portant sur le même sujet, montre que les sauveteurs non professionnels et donc moins protégés, présentent des concentrations de toxiques plus élevées que les victimes directes de l'incendie. Cela s'explique par le fait qu'ils sont plus proches de l'endroit de production des gaz et des fumées et car leur activité physique soutenue augmente leur rythme de ventilation et par conséquent, l'absorption pulmonaire des gaz toxiques.

1.1.3. Enseignements issus des accidents

1.1.3.1. Constats

S'il semble donc acquis que la lutte contre les incendies nécessite des dispositions mentales et physiques en raison des responsabilités liées au sauvetage des vies ou à la préservation des biens, cela reste un travail exigeant où les brûlures, les chutes et les lésions par écrasement sont répandues et où l'exposition aux fumées et aux gaz chauds est fréquente (Gochfeld, 1995).

Aussi comme cela a été présenté, les publications sur les contraintes et les exigences de ce travail sont nombreuses avec une littérature qui présente aussi bien les aspects environnementaux et les méthodes d'attaque du feu avec ses effets thermiques, que le travail physique des soldats du feu avec les astreintes cardiovasculaire et physiologique (Giguère 1995). Dans ces références documentées, plusieurs études s'entendent même pour dire qu'en général, les pompiers ne sont pas des athlètes et si la condition physique était un important critère de sélection, elle s'estompe avec les années.

A cet effet, il convient de rappeler qu'en France, les services d'incendie et de secours sont avec 190 000 hommes et femmes, majoritairement constitués de volontaires, dont la profession principale est différente de celle de sapeur-pompier et qui n'offre sans doute pas la possibilité d'une pratique sportive assidue. Par contre, l'activité physique faisant partie intégrante du travail quotidien des pompiers professionnels et des militaires, ces derniers se doivent donc d'être en bonne condition physique.

1.1.3.2. Evolution des règles de construction

Grâce à la richesse des statistiques relatives aux incendies et aux enseignements qui en sont tirés, de nombreuses mesures de prévention, tant constructives, qu'organisationnelles et matérielles sont régulièrement développées et mises en application (Brushlinsky et al., 2005). Depuis plusieurs dizaines d'années, la construction et l'exploitation des établissements recevant du public, des immeubles de grande hauteur, des immeubles d'habitations et des installations classées pour la protection de l'environnement sont réglementées afin de garantir la sécurité des personnes et la protection des biens.

Différentes études sur les comportements au feu des matériaux de construction ont permis l'élaboration d'un panel de référentiels techniques afin que les bâtisseurs confèrent aux constructions des stabilités et des tenues au feu suffisantes pour que les occupants puissent évacuer les lieux et que les secours puissent intervenir et maîtriser les sinistres avant même que la dégradation des structures intérieures ne provoque des situations irréversibles et dramatiques. La validation des règles de construction et de sécurité contre l'incendie s'inscrit dorénavant dans une dimension européenne voire mondiale, avec une harmonisation des normes techniques entre les pays (Sainrat, Blanc, 2003). Malheureusement, si les nouvelles constructions semblent conçues selon les critères de sécurité, l'application de ces dernières dans les bâtis existants reste encore insuffisante et parfois mal interprétée, comme en témoignent les dramatiques incendies qui ont touché Paris l'été 2005 (Denoyelle, 2005). Le patrimoine immobilier français recèle encore dans le cœur des villes ou dans les citées dortoirs des constructions vétustes ou dégradées qui deviennent en cas d'incendie de véritables pièges pour leurs occupants.

L'évolution des règles de construction et la réaction au feu des matériaux créent cependant d'autres dangers. La généralisation des produits de synthèse dans l'aménagement des locaux d'habitations ou professionnels entraîne une modification des méthodes empiriques de la lutte contre le feu, notamment lorsqu'il s'agit de feux en espaces clos ou semi-confinés.

L'amélioration de l'isolation des volumes, par exemple, influe très sensiblement sur le développement du feu : un petit foyer peut très rapidement atteindre un stade où l'ensemble des matériaux contenus dans la pièce distillent des gaz de pyrolyse sous l'effet de la chaleur conduisant soit à l'embrassement généralisé du local si celui-ci est partiellement ouvert, soit à une accumulation considérable de gaz combustibles pouvant évoluer en explosion lors de l'introduction du comburant manquant, s'il est fermé.

1.1.3.3. Réflexions sur la conduite de l'attaque du feu

La lutte contre l'incendie reste une action délicate qui demande sans cesse des moyens et des formations nouvelles avec une organisation opérationnelle structurée. Les changements d'état de la matière, la stratification des fumées et des gaz chauds, le sens du tirage sont des phénomènes qu'il s'agit d'observer au plus vite, afin d'anticiper sur l'évolution du feu par une conduite opérationnelle méthodique et structurée.

C'est donc à partir d'analyse, telle que celle menée par la brigade sur l'épidémiologie des brûlures de sapeurs-pompiers que des progrès significatifs peuvent être apportés à la sécurité du soldat du feu.

Les observations qui mettent en évidence que près de 70% brûlures du pompier sont localisées sur la partie supérieure du corps, permettent de déboucher sur un double constat :

- la position d'approche et d'attaque du feu nécessiterait d'être révisée, afin que dans un volume embrasé où les gaz chauds s'accumulent essentiellement en partie haute, la posture du porte-lance soit la mieux adaptée pour réduire son exposition aux effets thermiques ;
- les limites d'emploi des équipements de protection individuelle ne devraient plus être fixées à partir de leurs seules performances intrinsèques et normatives, mais selon une approche ergonomique où il est tenu compte des interfaces développées entre chacun des éléments afin que les intervenants puissent connaître leurs seuils physiologiques au-delà desquels ils encourent un danger.

1.2. Les équipements de protection individuelle (EPI)

Très récemment, il était publié dans une revue spécialisée sur les soldats du feu que : « *Du danger naît la protection. D'abord signe de reconnaissance, la tenue du pompier a évolué, au fil du temps, en fonction des risques auxquels le soldat du feu est confronté. L'histoire des équipements des sapeurs-pompiers est intimement liée à celle des sapeurs-pompiers de Paris* » (Cosseron, 2006).

1.2.1. Historique

Avec la militarisation du Corps, les sapeurs-pompiers de Paris se voient attribuer dès 1822, un uniforme qui comporte une capote bleue, une veste ou un gilet à manches, un pantalon de drap bleu large, une paire de petites guêtres noires, deux pantalons blancs larges, deux paires de petites guêtres blanches et un bonnet de police. Pendant plus d'un demi-siècle, cette tenue n'évolue que très peu, elle sera juste complétée par un ceinturon de pompier en cuir de vache noirci et, les habits et les capotes seront transformés en tuniques (Decloquement et Bertin, 2003). Au début du 20^e siècle, les vêtements de feu seront imperméabilisés au moyen d'un mélange d'alun et de paraffine et les officiers et les adjudants sont dotés des premiers vestons de cuir confectionnés en mouton chaîné noir et doublés en satin de coton. Ces vestons de cuir sont portés par-dessus la tunique ou la veste. En 1909, une cravate de feu constituée d'une bande d'étoffe de satin de laine noire est mise en service. Jusqu'au début des années 1980, ce bout de tissu offrait au pompier une protection respiratoire en lui permettant de se couvrir une partie du visage lorsqu'il évoluait dans une ambiance méphitique.

Il faudra attendre l'année 1962, pour que la tenue des sapeurs-pompiers soit réglementée. La tenue de feu comprend ainsi :

- un pantalon en drap cardé bleu foncé, modèle whipcord
- une chemise en viscose de couleur bleue et une cravate noire ;
- un veston de peau, confectionné en cuir de mouton de teinte noire, entièrement doublé en molleton et s'ajustant à la taille au moyen d'une ceinture. Ce cuir est muni d'un col chevalière, de manches raglan et de poches ouvertes obliquement sur le côté et recouverte de pattes. Sa fermeture est assurée par une rangée de boutons sous patte ;
- un ceinturon d'incendie, confectionné dans une sangle en coton noir et fermant au moyen d'une boucle à ouverture rapide, avec un porte-mousqueton à touret ;

- une cravate de feu confectionnée dans une serge de laine noire ;
- une paire de gants de protection, de coupe américaine, avec la main en croûte chromée, le dessus en toile métisse forte ;
- une paire de bottes d'incendie en cuir noir ;
- un casque modèle 1933, en acier inoxydable.

La mise sur le marché de nouvelles fibres textiles comme les aramides, va profondément modifier la confection des équipements vestimentaires. Et c'est en s'inspirant du nouvel uniforme de travail dont s'est dotée l'armée française que la brigade choisit dès 1982 d'équiper ses effectifs d'une nouvelle tenue d'exercice et d'intervention. Conçue en textile thermostable (50% aramide et 50% viscose), la tenue appelée SPF1 dispose de qualité d'ininflammabilité (Malburet, 1983) et se révèle très facile d'entretien.

En 1986, une nouvelle réflexion débute sur la protection des mains et des avant bras. A cette époque, la brigade ne disposant d'aucun équipement de protection adapté, enregistre une recrudescence de coupures et de brûlures aux membres supérieurs (BSPP-BOPE, 1987). La réponse à ce manque de sécurité est apportée suite à une collaboration avec les bureaux d'études d'Electricité de France (EDF). Après quelques expérimentations, un gant de protection en cuir de bovin avec un crispin en croûte de cuir de dix centimètres, décliné du gant porté par les agents d'EDF, est adopté, puis progressivement mis en service (Ben Mohamed, 1998).

La fin des années 1980 est mise à contribution pour l'amélioration des tenues de feu. Plusieurs évolutions sont apportées au veston de peau : un traitement hydrophobe du cuir améliore sa très mauvaise tenue à l'eau, la pose d'une bande de couleur gris argent rétro-réfléchissante autour du buste rend la localisation du porte-lance dans les milieux enfumés plus facile. Enfin, un nouveau design avec une veste plus longue, diminue les risques de brûlures aux fesses et aux cuisses (Berneise, 1987(a), (b) ; Santot, 1991).

1.2.2. Des équipements de protection individuelle conçus selon de nouvelles normes.

Avec la parution en 1989, des directives européennes (89/686/CEE, modifiée par les directives 93/68/CEE de 1993 et 96/58/CE de 1996) fixant les exigences essentielles de sécurité pour les EPI et leurs utilisateurs, un cadre réglementaire est posé. De nombreux travaux normatifs débutent et des référentiels techniques sont élaborés (Agopian et al., 2006 ; Zaglia et Alibert, 1998 ; Leroy et al, 2000, Venes le Morvan, 2005).

On constate cependant que malgré l'amélioration des protections, le nombre de brûlures est en hausse (BSPP-BOPE, 1988). Par exemple, la protection apportée par le casque F1 et notamment le recouvrement des capteurs de températures naturels que sont les oreilles, pousse le porte-lance à s'engager plus rapidement et surtout davantage. Les nombreuses brûlures localisées au visage, à la nuque, ainsi que sur les bras et sur le haut du buste, incitent les responsables de l'habillement de la brigade à mettre en place une protection supplémentaire par un effet de multicouches et le port d'une veste modèle F1 en aramide viscosse sous la veste de protection en cuir est rendu obligatoire (Berneise, 1988). Les premières réflexions sur la cagoule sont également lancées.

Au début des années 1990, des constats d'usure prématurée des tissus en textile sont relevés, occasionnant ainsi une réduction des protections thermique et mécanique. Pour pallier la fragilité de la viscosse, de nouvelles compositions de textile sont testées et un tissu technique 100 % aramide remplace la matière défilante.

Confrontés à de nouveaux types d'incendie ou à des risques d'explosion, notamment d'origines technologiques, les sapeurs-pompiers de Paris enregistrent entre 1991 et 1993, une hausse de brûlures aux deuxième et troisième degrés localisées aux membres inférieurs (BSPP-BOPE, 1994). Le principe de la protection par superposition de couches de vêtements est alors étendu aux cuisses et aux jambes. De nouvelles expérimentations portent sur le port d'un sous-vêtement de type « bermuda » en coton et, sur un sur-pantalon confectionné avec le même tissu que la veste F1.

Certes, le port d'un effet vestimentaire supplémentaire ne présente alors, pas que des avantages et les premiers essais font état d'un inconfort et d'une sudation accrue du porteur, d'une augmentation des délais d'habillement et de gênes lors du port, enfin, le vêtement est inesthétique. Après de nouvelles améliorations, notamment en terme de confort au porté, le sur-pantalon qui augmente en revanche considérablement la protection contre les rayonnements thermiques, est adopté (Minerva, 1993).

Les grands groupes de l'industrie chimique, tels que Kermel et Dupont-de-Nemours poursuivent le développement de nouvelles fibres (Desitter, 1993). L'élaboration des normes techniques européennes relatives aux vêtements d'intervention pour sapeurs-pompiers accélère la mise sur le marché de nouveaux produits en « Kermel © » ou en « Nomex © ». Ces équipements éprouvés en laboratoire semblent présenter de bonnes garanties de protection contre les effets thermiques ce qui incite de nombreuses unités de sapeurs-pompiers à procéder à des expérimentations.

La brigade teste à partir de 1994, une veste d'intervention qui répond aux critères techniques normalisés, cependant lors d'essais, de nombreux utilisateurs manifestent des gênes qui se traduisent par un effet « cocotte minute » (Stemmelen, 1995). Il s'agit du stress thermique qui provient de la combinaison de conditions environnementales particulières, de l'état du métabolisme du sapeur-pompier lors de l'activité physique et de la nature des vêtements portés qui influencent la température interne du corps.

De nouvelles expérimentations sont conduites dans les différentes unités élémentaires de la Brigade. Le veston de peau n'est pas abandonné, un nouveau modèle avec une doublure thermo-isolante est même mis au point, puis mis en dotation à partir de 1996. La conception de cette veste intègre une protection additionnelle de type « thermos » par l'apport de bourrelets et d'espaceurs au niveau des épaules (Douville, 1993 ; Stemmelen, 1995).

Afin d'appréhender au mieux les critères de vieillissement, les tenues d'intervention en textile sont maintenues en service. On constate que la protection hydro-thermique constituée d'une membrane imper-respirante et d'une couche de feutre se délite rapidement (Rossi, 1997). La membrane n'assure plus l'évacuation de la perte hydrique, le feutre joue un rôle d'accumulateur de chaleur et d'effet « éponge » en se chargeant d'humidité, ce qui est particulièrement inconfortable et dangereux pour l'utilisateur. Ce modèle de veste sera retiré du service en 1998 et de ce fait, confirme que les techniques sur le marché européen ne répondent pas encore aux besoins des sapeurs-pompiers (Desbois, 1998).

En 2000, de nouveaux axes de recherches entrepris avec les industriels, s'appuient sur le cadre normatif européen qui s'est affirmé (Inzé, 2003 ; Inzé, 2005). Les derniers progrès réalisés dans le secteur de la chimie des polymères ont permis la mise au point de nouvelles fibres synthétiques faisant partie de la famille des aramides. Il s'agit de chaînes polycarbonées comportant des fonctions aromatiques contribuant à assurer, à haute température, la stabilité moléculaire. A partir de ces fibres sont fabriqués des fils, puis les tissus qui composent les tenues d'intervention en textile. Généralement une veste d'intervention n'est pas conçue d'une seule épaisseur de tissu, mais de couches superposées constituant un « complexe ». Cet assemblage qui pèse environ 550 g/m², se compose sur la partie extérieure d'un tissu en aramide et sur la partie intérieure qui est en contact avec la personne, d'une doublure de propreté, amovible ou non. Entre ces deux couches en partie intermédiaire supérieure : une membrane imper-respirante laminée sur un support et, en partie intermédiaire inférieure : une matière isolante souvent un non-tissé qui constitue la barrière thermique (Heidet, 2002).

Chaque couche ayant sa spécificité, le vêtement dispose de propriétés d'ininflammabilité, de thermostabilité, de faible conduction thermique, d'absence de point de fusion et de résistance aux produits chimiques.

Enfin, l'élaboration de cet équipement intègre d'autres critères, tels que l'hygiène, grâce à une meilleure respirabilité du complexe de protection et, l'entretien avec la mise en place d'un protocole de lavage, de séchage et de désinfection (Thiriot, 1999).

Le troisième millénaire sera fatal au « veston de peau » (Mathieu, 1997).

Un concept de protection graduée de l'ensemble textile selon trois niveaux est donc élaboré (membres inférieurs, corps et bras, haut du buste). Ce nouvel ensemble est constitué d'une veste avec membrane imper-respirante (hydrophile), d'un isolant thermique constitué par des canaux d'air (pas de feutre), d'une protection additionnelle des épaules et d'un sur-pantalon mono-couche renforcé aux genoux, qui recouvre le pantalon F1 de la tenue de service.

Le nouvel ensemble de protection du sapeur-pompier est adopté par la Brigade (Stemmelen et Cantarel, 2001), il s'agit d'un équilibre entre la sécurité, la protection, l'hygiène, le confort et l'esthétique (Rossi, 2001).

Parallèlement aux premières réflexions sur la mise au point de l'habillement, des études visant à faire évoluer la protection de la tête des pompiers lors de l'intervention des pompiers de Paris débutent en 1975.

1.2.3. La protection de la tête

Avec la création du bureau d'études, la mise au point d'équipement de protection individuelle devient pendant les années 1970, l'une des priorités de la brigade. Les premiers travaux portent sur la définition d'un nouveau casque d'intervention. Avec l'extension de l'infrastructure parisienne, les performances du casque métallique modèle « Franck », alors en dotation, sont rapidement limitées. Cet équipement de tête, qui est une évolution, sans modifications fondamentales du premier casque pour pompier créé en 1765, représente en fait essentiellement la coiffure d'arme du corps (Lemire, 1983).

Pendant plus d'un demi-siècle, le casque en acier chromé modèle 1933 – héritier direct du casque Adrien qui coiffa les poilus de la grande guerre – fut le symbole même de la silhouette du sapeur-pompier français.

S'il assure une parfaite protection de la partie supérieure de la tête contre les projections et les chocs, de nombreuses autres fonctions telles la protection de la nuque contre la chute d'objet, la préservation du visage contre le flash thermique, le manque de stabilité, la conduction d'électricité ou encore la faible isolation thermique, ne sont pas ou sont incomplètement assurées.

De plus, pour coiffer un appareil respiratoire isolant il faut l'enlever et il est difficile d'y intégrer un système respiratoire relié à une réserve d'air respirable et un dispositif de transmission phonique.

L'évolution des constructions et notamment la diversification des immeubles de grande hauteur et des immeubles sur dalle, oblige les équipes d'interventions à s'engager davantage lors des sinistres, ce qui modifie les besoins opérationnels et implique nécessairement un équipement auquel pourraient être éventuellement intégrés un système de communication phonique et un dispositif d'éclairage. A l'époque, les responsables du bureau d'études estiment que : « *de tels équipements présenteraient en tout premier lieu l'intérêt de donner au porteur la confiance en soi, indispensable pour assurer une intervention efficace* » (Legendre, 1982 ; BSPP/BEG, 1983). Il n'est pas encore question de stress du sapeur-pompier.

A l'étranger, les casques des sapeurs-pompiers n'offrent pas de meilleures protections que le casque modèle 1933. Dans certains pays, les pompiers sont encore équipés de casques en cuir bouilli, en cuivre ou en inox et avec parfois quelques accessoires comme un couvre nuque ou une visière pare flammes. D'une manière quasi générale, les casques en service à la fin des années 1970, résultent d'une adaptation des coiffes des combattants des dernières guerres (Rolland, 2000).

Parfaitement consciente de cette situation, la brigade lance, dès 1978, en collaboration avec la direction des recherches, études et techniques et avec la Délégation Générale pour l'Armement, une étude de faisabilité pour la réalisation d'un nouvel équipement de tête pour le sapeur-pompier. Intégré dans une étude ergonomique poussée, le casque est développé avec les meilleures technologies disponibles afin de combler les carences du casque métallique. La réalisation sera de type modulaire.

Ainsi, à partir du module de base qui assure une protection multidirectionnelle contre les chocs et les agents corrosifs, il est possible d'ajouter des fonctionnalités particulières comme l'éclairage, la communication, la protection contre le flash thermique et l'adaptation d'un dispositif respiratoire. Par ailleurs, un soin particulier est porté à l'aspect esthétique.

Entre 1980 et 1984, six prototypes seront conçus, les derniers présentant la particularité de pouvoir mettre en place instantanément le masque de l'appareil respiratoire tout en assurant une excellente étanchéité, quelle que soit la forme du visage du porteur (Legendre, 1982 ; BSPP/BEG, 1983). En 1984, la société Gallet procède à la fabrication d'une présérie de 1 800 casques conformes au sixième prototype et en août 1985, la brigade le met en service à Paris. Il reçoit l'appellation de casque « modèle F1 », non pas en raison de sa ressemblance avec ceux des coureurs automobiles, mais parce qu'il s'inscrit dans un nouveau type de tenue dont s'est dotée la brigade à partir de 1982 et dénommée la tenue SPF1 (Soton, 2007).

Le casque F1 est constitué d'une calotte extérieure enveloppante en matériau composite, revêtue de nickel par galvanisation. Le nickelage évite par réflexion que la calotte qui assure une protection intégrale de la tête et de la nuque, ne s'échauffe et que la température s'élève à l'intérieur du casque. Le cimier, ou calotin, est formé par une nervure longitudinale qui s'estompe au niveau du béquet avant. Il constitue un amortisseur pour absorber les chocs. La bombe supérieure du casque loge deux écrans amovibles :

- un écran de protection oculaire, transparent, escamotable dans la calotte, qui s'abaisse au moyen d'une molette placée sur le côté du casque ;
- un écran facial miroité couleur dorée, également escamotable dans la calotte et rabattable jusqu'à la lèvre inférieure. Grâce à sa forme couvrante, il assure une protection intégrale du visage contre les projections horizontales et le flash thermique.

Le confort est obtenu par un bandeau de tête facilement ajustable et deux coussins de nuque afin d'assurer une stabilité idéale. Une jugulaire deux points, avec un brin de nuque, est liée à la partie rigide du casque.

Elle est équipée d'une mentonnière en cuir, à fixation réglable par velcro. L'isolation thermique et l'aération sont obtenues par le revêtement réfléchissant de la face externe de la calotte, ainsi que par l'aménagement d'espaces laissés libres entre le sommet de la tête et l'intérieur de la calotte et entre le tour de tête et l'intérieur de la calotte. Son ergonomie permet le port d'un masque d'assistance respiratoire et de systèmes d'éclairage et de communication. La perception des bruits extérieurs n'est pas diminuée de plus de 10 % et aucun phénomène de résonance n'est perçu lorsque l'écran facial est baissé.

Le casque F1 constitue une « révolution » technique et esthétique, utilisé depuis sa création dans plus de quatre vingt cinq pays (Anselme, 1986 ; Boissard, 1994). Pourtant cet équipement continue à évoluer.

Pour répondre au cadre normatif technique européen, relatif aux casques de pompiers (CEN 1997), le concepteur s'est lancé en 1997 dans une étude morphologique au cours de laquelle plus de 20 000 têtes ont été scannées et étudiées afin de concevoir un support couvrant 99 % de la population des sapeurs-pompiers européens. Au total, se sont trente-deux versions de casques F1 qui sont proposées aux utilisateurs (Maître, 2000 ; Letourneur (b), 2005 ; Zaglia et Boisard, 2005).

1.2.4. Les évolutions techniques de la protection respiratoire

A travers les âges, l'un des soucis majeurs et constants des responsables des services de lutte contre l'incendie a été celui de préserver les intervenants contre les risques mortels d'asphyxie que représentent les fumées et les gaz irrespirables dégagés par la combustion des matières inflammables. Pour cela, il fallait que le porteur soit doté d'un appareil pratique et sûr assurant une protection respiratoire efficace. Cet équipement devait permettre de séjourner sans risque dans la fumée pour effectuer les premiers sauvetages et l'extinction du feu dès son éclosion. Depuis la fin du 18^e siècle, différents types d'appareils respiratoires ont été créés (Gay (a), 1982 ; Gay (b), 1983). Parmi les plus utilisés par la profession il y eut tout d'abord en 1824, un masque-cuirasse à double surface avec une circulation d'air, puis en 1835, la blouse Paulin (Figure 1.19).

Cet appareil qui alimenté en air frais par une pompe à bras traditionnelle, sera modifié au milieu du 19^e siècle, pour être alimenté par une pompe à air à soufflets, actionnée à la main ou par la pression de l'eau, provenant d'un petit tuyau branché sur une division.



Figure 1.19 : Blouse Paulin (photo BSPP)

A la fin du 19^e siècle, les « appareils à feu de cave » font leur apparition. Il s'agit de casques respiratoires en laiton du constructeur Cassada. Leur mise au point a été réalisée en étroite collaboration avec le major-ingénieur Krebs des sapeurs-pompiers de Paris. Le Régiment parisien en mettra d'ailleurs en service à partir de 1895 (Rolland, 2002). A cette période, des scientifiques et des industriels s'associent pour concevoir de nouveaux matériels.

Les constatations faites au cours des explosions minières avec des émanations de grisou ou en 1903 lors de la catastrophe de la station du métropolitain Couronnes à Paris, mettaient en évidence que ce n'était pas la chaleur des flammes qui faisait le plus de victimes, mais surtout les gaz asphyxiants. Or, comme à cet époque, les sauveteurs ne disposaient pas d'autre moyen que de se relier à un tuyau d'amenée d'air, pour pénétrer dans les gaz irrespirables comme avec les scaphandriers, il paraissait naturel que l'on cherche à réaliser un appareil respiratoire « autonome ». D'autant plus, que le tuyau d'amenée d'air relié à l'extérieur pouvait être obstrué par suite de courbes et de plis dès lors que la distance à parcourir était grande.

Le principe de l'appareil respiratoire « autonome » permet ainsi, à l'homme d'emporter sur lui une quantité d'air suffisante pour vivre dans n'importe quelle atmosphère pendant un certain temps, ce qui le rend ainsi indépendant de l'air extérieur.

L'air comprimé fût alors utilisé et l'ingénieur Vanginot, officier des pompiers de Paris, mit au point un appareil qui permit aux sauveteurs d'augmenter leur moyen d'action.

Grâce à cette avancée technologique, le porteur inspire de l'air comprimé dans un réservoir spécifique, avant de le rejeter au dehors ; ce qui l'autorise à évoluer dans n'importe quel milieu irrespirable pendant une quinzaine de minutes (Rolland, 2000).

En ce début de 20^e siècle, un masque préservateur d'asphyxie dénommé « Paravapor » est inventé (Maury, 1903) et sera adopté par les Corps de sapeurs-pompiers de Lyon, de Marseille et du Havre. Son inventeur décrit l'appareil comme étant léger, en forme de masque d'escrime qui s'adapte facilement au visage et qui permet de pénétrer, de respirer à l'aise et de séjourner dans les fumées et les atmosphères asphyxiantes. Simple et pratique d'utilisation, il n'exige ni pompe à air, ni réservoir d'air, ni appareillage quelconque et la production d'air nécessaire aux poumons est obtenue par réaction chimique. De plus, la validation des performances de l'appareil est obtenue suite à des essais organisés la même année à Paris, en présence de représentants de la presse, de l'administration et sous le contrôle de scientifiques de la Faculté de médecine de Paris. Ainsi, dans une atmosphère spéciale où furent accumulés des gaz délétères et où un lapin fut asphyxié aussitôt introduit, l'expérimentateur y a évolué et en est sorti après trente minutes (Rolland, 2000)

De leur côté, le docteur Gughelminette et l'industriel Draeger imaginent un appareil basé sur l'emploi de l'oxygène comprimé en s'appuyant sur des travaux en physiologie et les expériences classiques de Regnault et Reiset qui ont nettement établi que si l'on absorbe par la potasse l'acide carbonique éliminé, et si l'on remplace l'oxygène à mesure qu'il est consommé, une quantité limitée d'azote peut servir indéfiniment à la respiration (Figures 1.20 et 1.21).

Etant donné que l'azote ne joue pas de rôle actif dans l'échange des gaz respiratoires, il est inutile de surcharger le sauveteur en emmagasinant de l'azote sous pression. Ces travaux débouchent plus tard sur la mise au point du premier type d'un appareil respiratoire à circuit fermé (Cyon, 1876). En 1910, le nouveau casque respiratoire Vanginot-Mandet équipe les sapeurs-pompiers. Un sac pneumatique gonflable par l'intermédiaire d'une poire assure l'étanchéité sur le pourtour du visage. Une poche en caoutchouc avec sa housse en cuir formant un poumon régulateur attenante au casque est déployée sur la poitrine du porteur. Elle est alimentée soit au moyen d'une batterie de deux bouteilles d'air comprimé gonflées à 150 bar, soit par un compresseur manuel.



Figure 1.20 : Appareil respiratoire Draeger (photo BSPP)

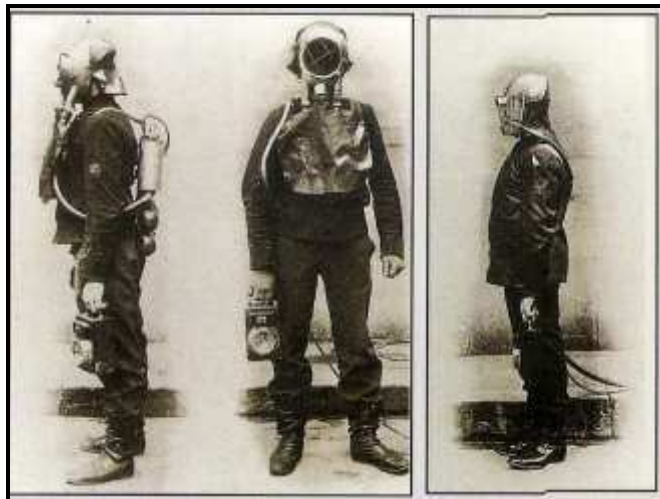


Figure 1.21 : Appareils respiratoires Gughelminette (photo BSPP)

Au milieu des années 1930, apparaissent les premiers appareils à circuit ouvert de type Mandet et Commeinhes. Ce type d'appareil toujours utilisé de nos jours n'a cessé de s'améliorer et de se transformer au fil des années. Schématiquement, un respirateur se comporte de cinq éléments principaux : un dossard, une réserve d'air en deux bouteilles de quatre litres sous 200 bar, un détendeur haute pression et une pièce faciale permettant au porteur de s'isoler de l'atmosphère viciée. Son poids varie selon les constructeurs de 10 kg à 18 kg (Ben Mohamed et al., 2007).

En 1974, des travaux de normalisation débutent et la conception des ARI se standardise pour répondre aux exigences de référentiels techniques homologués par les pays européens (DDSC, 1999). Avec ce rapprochement des pays européens de nouvelles orientations tendent vers le développement d'appareils respiratoires avec une bouteille d'air en matière composite (Benedittini, 1994 ; Letourneur (a), 2005 ; Benedittini, 2006).

Des tests sur ces réservoirs sont réalisés afin d'en mesurer leur fiabilité (CETIM, 2003), mais c'est une nouvelle fois, un accident mortel en intervention qui provoquera une accélération dans le processus des réflexions menées jusque là.

Pendant ces années un autre type d'appareil a également été développé, il s'agit de l'appareil respiratoire à circuit fermé dont le fonctionnement est basé sur la régénération de l'air expiré. L'emploi de ce matériel qui est réservé à des spécialistes des missions de recherches longues et profondes ne fait cependant pas l'objet de la présente étude.

1.2.5. Les leçons d'un drame

En août 1993, lors de l'attaque d'un feu de cage d'escaliers, un sapeur-pompier décède électrocuté. La conductibilité de l'appareil respiratoire isolant (ARI) et notamment celle des bouteilles d'air en acier est mise en cause. Les fonctionnalités des appareils sont réétudiées, et trois ans plus tard, le prototype d'un nouveau matériel est expérimenté. Le décès du porte-lance ayant été provoqué par un contact direct de conducteurs électriques sous tension avec les bouteilles métalliques de sa réserve d'air, le nouvel équipement est muni d'un carter de protection recouvrant les parties métalliques (Massoni, 1994 ; BSPP/BEG (a), 1996).

Par ailleurs, l'évolution des infrastructures parisiennes et notamment l'extension des réseaux de métropolitain et la multiplication des parcs de stationnement souterrains, incitant la brigade à augmenter l'autonomie disponible de l'appareil respiratoire, un nouveau volume d'air est arrêté (Leroy et al. 2001). Les bouteilles d'air comprimé d'une contenance de huit (2 X 4) litres sous 200 bar sont remplacées par une capacité unique de 9 litres sous 300 bar (Figure 1.22). Cette dernière est constituée d'un liner en aluminium protégé de bobinages en fibre de carbone puis en fibre de verre, afin que la bouteille dispose de caractéristiques mécaniques et d'isolement conformes aux référentiels techniques prévus pour ce type d'équipement (Everett, 1976, Bréand, 1997 ; Ben Mohamed, 1998, Griefahn et Künemund, 1999).



Figure 1.22 : Appareil respiratoire isolant SPF1 (photos BSPP)

Avec cette protection, le porteur de l'ARI mono-bouteille dispose d'une réserve d'air théorique d'environ une heure pour remplir sa mission.

1.2.6. Une nouvelle génération d'équipements

Après d'ultimes mises au point et tout en poursuivant des expérimentations complémentaires sur d'autres protections vestimentaires telles que les sous-vêtements, les sur-pantalons et les gants d'intervention en textile, le commandement de la brigade décide à partir de 2001, de mettre cette nouvelle génération d'équipements de protection individuelle en service.

En application des règles publiques d'achats, les appels d'offre pour le remplacement de l'appareil respiratoire isolant bi-bouteilles et du veston de peau par l'ARI mono-bouteille et des ensembles textiles, sont lancés.

Les choix techniques étant arrêtés (Martin et al., 2004), il s'agit de définir puis de valider les limites d'emploi des nouveaux EPI avant leur mise en service opérationnel, car l'augmentation de l'autonomie respiratoire laisse à penser qu'au vu de la charge de travail de l'utilisateur et des contraintes liées à l'ambiance thermique, les caractéristiques de la tenue peuvent amener, dans un temps équivalent à la nouvelle autonomie du respirateur, une fatigue intense, une déshydratation importante ou même un risque de coup de chaleur (Medelli et al., 1996 ; Medelli et Fullana, 2002 ; Torres, 2006).

Pour déterminer avec une bonne précision les contraintes et les limites d'emploi de ces nouveaux matériels pendant les séances d'entraînement et surtout lors de la lutte contre le feu, une méthodologie est arrêtée. Il s'agit d'évaluer et de comparer le comportement du porte-lance muni successivement des anciens puis des nouveaux équipements lors de scénarios prédéfinis.

Contrairement à de nombreuses réflexions sur la gestion des risques professionnels et notamment dans le cas des ambiances thermiques chaudes (Malchaire, 2002 ; Malchaire et al., 2001 ; Candas, 2000 ; Malchaire, 1996 ; Mairiaux et Malchaire 1983 ; Malchaire, 1980), la détermination d'une durée d'engagement d'un sapeur-pompier sous protection respiratoire pendant l'attaque du feu, n'a fait l'objet que de très rares études spécifiques (Finteis et al., 2002 ; Kortt et al., 2003 ; Marlot 1994 ; Rumler et Helbig, 2002 ; Géronidal et al., 2004 ; Pham et al. 2005), sans doute en raison des risques liés à ce genre d'exercice sans structures techniques adaptées et de la nécessité de tenir compte de nombreuses variables tant interindividuelles, que physiologiques et encore environnementales.

Avec le choix de la mise en service d'une tenue d'intervention en textile et d'un respirateur avec une heure d'autonomie, la brigade s'est attachée à définir les limites d'emploi de ces nouveaux matériels en les testant sur le porte-lance dans une phase d'extinction du feu. La maîtrise de la sécurité du pompier, même dans des situations extrêmes restant l'objectif principal de la conduite des essais, un cycle d'études avec plusieurs étapes est développé.

Chapitre 2.

Caractéristiques des équipements de protection individuelle

-
- 2.1. Description technique et ergonomiques des ensembles d'intervention
 - 2.2. Détermination de la résistance à la vapeur d'eau des ensembles d'intervention
-

Le premier paragraphe décrit la méthodologie et les résultats des mesures des caractéristiques intrinsèques des équipements de protection. Ainsi, la masse, la perméabilité à l'air et l'isolement thermique de chaque effet d'habillement sont évaluées.

Les mesures détaillées dans le deuxième paragraphe tiennent compte du fait que l'évaporation et les transferts d'eau doivent être prises en compte car ils influent non seulement sur le confort au porté mais également sur les transferts de chaleur.

La première série a donc pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques de prototypes de tricot en textile au moyen d'indices de confort.

Dans un second temps, il s'agit de déterminer l'influence des transferts de sueur à travers différentes configurations de protection vestimentaire.

2.1. Détermination des caractéristiques techniques et ergonomiques des ensembles d'intervention

2.1.1. Description des équipements

Deux générations d'équipements (E1 et E2Co) en service à la brigade, décrites dans le tableau 2.1 et se composant d'une tenue de base, d'une tenue d'intervention et d'une protection respiratoire telles que représentées par les figures 2.1 et 2.2, ont servi de support aux premiers essais.

Tableau 2.1: Les équipements testés

<i>Eléments</i>	<i>Equipement E1</i>	<i>Equipement E2Co</i>
Casque « Gallet F1 »	X	X
Tour de cou (50% en laine et 50% en aramide)	X	
Cagoule en Fitek © (70% en aramide et 30 % en modacrylique)		X
Chemise F1 MC (polo manches Courtes) (100% en coton)	X	X
Slip (100 % en coton)	X	X
Pantalon F1 (100% en aramide)	X	X
Mi-bas (50% en laine, 20% en polyester, 30% en polyamide)	X	X
Bottes en cuir	X	X
Sur-pantalon (100% en aramide)	X	X
Gants en cuir	X	X
Veste d'intervention	Cuir modèle 1996 avec doublure (50% en aramide et 50% en coton)	Textile avec un complexe en multicouches et une membrane imper-respirant
Ceinturon d'intervention (coton ignifugé)	X	avec longe de maintien
Appareil respiratoire isolant (ARI)	bi-bouteilles (2x4 litres en acier)	mono-bouteille (9 litres en composite)

La mise en service à la brigade des dernières versions des équipements E1 dits de l' « ancienne génération » date de 1995. Les expérimentations des équipements E2Co dits de « nouvelle génération » ont débuté en 2001.



Figure 2.1 : « Equipement E1 » dit de l'ancienne génération, sans ARI (Photos BSPP).



Figure 2.2 :« Equipement E2Co » dit de nouvelle génération (Photos BSPP).

Pour ces ensembles dont les caractéristiques techniques sont déjà conformes aux référentiels normatifs spécifiques aux équipements pour sapeurs-pompiers (Daveau, 2006), en vigueur au moment de leur conception, seules des mesures de paramètres techniques et ergonomiques ont été réalisées.

Le bilan des masses, la perméabilité à l'air et l'isolement thermique de chaque effet d'habillement ont été effectués pour chaque type d'équipement sur des appareillages et sur des mannequins thermiques instrumentés, afin d'établir une base de données nécessaire pour la simulation de scénarios permettant la détermination des limites de tolérance physiologique et de sécurité applicables lors des interventions.

2.1.2. Bilan massique des équipements E1 et E2Co

Les deux équipements évalués sont de taille identique et, la masse de chaque élément mesurée avec une balance Mettler ID1S équipée d'un moyennneur statistique est reportée dans le tableau 2.2 (Warmé-Janville (a), 2002).

Tableau 2.2 : Bilan massique de chaque équipement

Eléments	Equipement E1	Equipement E2Co
Slip	0.06	0.06
Chemise F1 MC	0.30	0.30
Mi-bas en laine	0.14	0.14
Pantalon F1	0.47	0.47
Bottes d'incendie	2.47	2.47
Tour de cou	0.14	sans objet
Cagoule en textile	sans objet	0.04
Veste d'intervention	Cuir 3.10	Textile 1.77
Sur-pantalon	0.44	Textile 0.73
Ceinturon d'incendie	0.42	0.63
Gants de protection	Cuir 0.28	Cuir 0.28
Casque F1	1.25	1.25
Poids total des effets d'habillement	9.05	8.13
Masque d'ARI	0.54	0.62
ARI	15.37 bi-bouteilles (8 litres – 200 bar)	13.76 mono-bouteille (9 litres – 300 bar)
Poids total de l'équipement (en kg)	25.00	22.50

Pour les deux types de protections vestimentaires, la tenue dite de « base » qui se compose du slip et du soutien gorge pour les femmes, des mi-bas, des bottes, du pantalon F1 et de la chemise F1, présente une masse totale identique. Par contre, on observe un écart de poids d'environ 18% entre les deux types de tenues d'intervention. L'écart le plus significatif est mesuré entre le veston de peau qui pèse $3,10 \pm 0,05$ kg et la veste en textile dont la masse est de $1,77 \pm 0,05$ kg.

Dans sa configuration opérationnelle, le poids total des vêtements de l'équipement E1 est d'environ 9,05 kg alors que celui des effets d'habillement de l'équipement E2Co est d'environ 8,13 kg. La nouvelle génération de tenues offre donc un gain de poids d'environ 10% par rapport à celle jusque là, en dotation dans les unités.

Concernant la protection respiratoire, on note également une différence de masse de plus de 10% entre les deux types de matériel avec un ARI bi-bouteilles qui pèse $15,37 \pm 0,01$ kg et un ARI mono-bouteille qui pèse $13,76 \pm 0,02$ kg.

En conclusion, on constate certes, qu'il y a un gain de poids avec le nouvel équipement puisque la charge portée par le porte-lance passe de 25,00 kg à 22,50 kg, mais on remarque également que s'il est avéré que la masse des effets d'habillement varie faiblement selon la taille du vêtement et le mode de tricotage des fibres textiles utilisées, le poids de l'ARI reste invariable quel que soit le gabarit du porteur. De ce fait, on peut estimer qu'un pompier de faible corpulence éprouvera sans doute plus de difficulté dans l'exécution de sa mission qu'un pompier avec une carrure d'athlète.

2.1.3. Perméabilité à l'air des équipements E1 et E2Co

La perméabilité à l'air des tenues a été mesurée selon la norme ISO 9237 (ISO, 1995), à l'aide d'un perméabilimètre à l'air (Figure 2.3), sur des échantillons de 20 cm² de textile de chaque effet d'habillement et conformément à la méthode décrite ci-après.



Figure 2.3 : Perméabilimètre à l'air FX 3300 (Photo Empa)

L'appareil aspire l'air à travers une tête de mesure interchangeable grâce à une pompe. Le tissu est placé sur cette tête et y est fixé en abaissant le bras presseur. La fixation de l'échantillon déclenche automatiquement l'aspiration et, après quelques secondes, la perméabilité de l'échantillon est affichée numériquement dans l'unité de mesure choisie. Une deuxième pression sur le bras presseur permet d'arrêter l'aspiration et de libérer l'échantillon. La pression d'essai est de 100 Pa. Pour évaluer les résultats des mesures, l'appareil est relié à un ordinateur qui à l'aide du logiciel d'évaluation LABODATA III, les convertit en « perte de pression à une vitesse d'air prédéterminée ». Pour chaque vêtement, cinq mesures sont réalisées et la moyenne des résultats obtenus est reportée dans le tableau 2.3 (Warmé-Janville (a), 2002).

Tableau 2.3 : Caractéristiques de perméabilité à l'air.

Perméabilité à l'air (l/m ² /s) ($\Delta p = 100\text{Pa}$)	Equipement E1	Equipement E2Co
Slip	616 $\pm$ 141	616 $\pm$ 141
Chemise F1 MC	538 $\pm$ 73	538 $\pm$ 73
Pantalon F1	95 $\pm$ 20	90 $\pm$ 5
Tour de cou	1240 $\pm$ 94	sans objet
Cagoule	sans objet	2814 $\pm$ 105
Veste d'intervention	cuir 4.02 $\pm$ 1,33	textile 2.06 $\pm$ 0,3
Sur-pantalon	150 $\pm$ 11	96 $\pm$ 4

Différents enseignements peuvent être tirés de ces résultats. D'une manière générale, les valeurs moyennes relevées montrent que les caractéristiques de perméabilité à l'air des différents éléments constituant les équipements E1 et E2Co sont très proches les unes des autres.

Les écarts constatés entre les sur-pantalons et les vestes d'interventions restent faibles. Concernant les deux sur-pantalons, on note que celui de l'équipement E1 autorise, selon les conditions de l'essai, une perméabilité à l'air d'environ 150 l/m²/s, alors que celui de l'ensemble textile se limite à 96 l/m²/s. Cet écart d'environ 36%, mesuré sur des échantillons normalisés de 20 cm², est dû au mode de tissage de la fibre textile et au mode de nettoyage des tenues.

Contrairement au « veston de peau » et au sur-pantalon modèle 1995, dont l'entretien est à la charge de l'utilisateur, le nettoyage de l'ensemble d'intervention en textile relève d'un protocole d'entretien avec un lavage industriel suivi d'une imprégnation par un produit de type fluocarboné. Cependant, ce traitement, tout en conférant à ces tenues une déperlance pour limiter l'effet des agressions par des produits chimiques et corrosifs, recouvre le textile d'une fine couche qui réduit les transferts d'air et d'humidité à travers le tissu (Jacques et Dosnes (a), 2005 ; Jacques et al (d), 2005, Chelingue et Charlot, 2005 ; De Vogüé, 2005).

Concernant les deux vestes d'intervention, même si l'écart semble important puisque la perméabilité du veston de peau est de 4,02 $\pm$ 1,33 l/m²/s et celle de la veste en textile est de 2,06 $\pm$ 0,3 l/m²/s, il n'est pas significatif et l'on peut considérer les deux effets comme étant intrinsèquement imperméables, surtout en comparant ces valeurs à la perméabilité à l'air d'une veste de travail SPF1² qui est d'environ 123 $\pm$ 6,4 l/m²/s.

² Veste SPF1 : veste de travail portée par le sapeur-pompier dans le cadre de l'exécution d'une mission courante.

2.1.4. Isolement thermique des équipements E1 et E2Co

2.1.4.1. Principes et définitions générales

La méthode de détermination de l'isolement thermique présentée ci-dessous est donnée par la norme ISO 9920 (AFNOR/ISO, 1995).

L'instrument le plus couramment utilisé pour mesurer l'isolement thermique d'une pièce vestimentaire ou d'une tenue vestimentaire est le mannequin thermique comme présenté par la figure 2.4 (Boutelier et Loncle, 1983 ; Buxton, Daanen et Spalding, 2003).

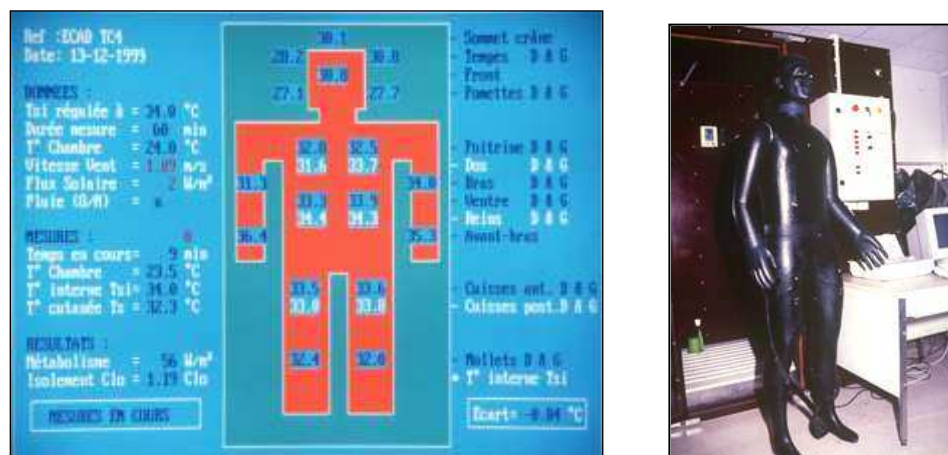


Figure 2.4: Centrale d'enregistrement et mannequin instrumenté (Photo CEB)

L'isolement thermique I_{cl} d'une tenue vestimentaire, (qui correspond également à la résistance à la perte de chaleur sèche du corps R_{ct} mesuré sur un échantillon), est défini comme l'isolement thermique intrinsèque du vêtement entre la peau et la surface externe du vêtement. L'isolement thermique I_{cl} est exprimé habituellement en Clo. La résistance à la perte de chaleur sèche du corps R_{ct} , est mesurée en mètre carré degrés Celsius par watt ($m^2 \cdot ^\circ C/W$) afin de faire la différence entre les mesures sur un vêtement entier et un échantillon :

$$I_{cl} = (t_{sk(moy)} - t_{cl(moy)}) / H$$

H : est la perte de chaleur sèche par mètre carré de surface cutanée (W/m^2);

$t_{sk(moy)}$: est la température cutanée moyenne ($^\circ C$) ;

$t_{cl(moy)}$: est la température moyenne de surface du sujet habillé ($^\circ C$).

Cette définition de l'isolement thermique d'une tenue vestimentaire donnée par la norme précitée, inclut également les parties non recouvertes du corps comme la tête et les mains, c'est-à-dire que la température moyenne de surface du sujet habillé est influencée non seulement par la température de surface du vêtement, mais aussi par la température cutanée des parties du corps non recouvertes.

En raison de cette définition particulière, il est approprié d'utiliser l'unité Clo pour l'expression de l'isolement thermique d'un vêtement (1 Clo = 0,155 m². °C/W).

La perte de chaleur sèche du corps par convection, rayonnement ou conduction intervient de la surface cutanée vers la surface du vêtement à travers celui-ci. La résistance à ce flux de chaleur est exprimée par l'isolement thermique intrinsèque I_{cl} .

Le flux de chaleur sèche est transmis sur la face externe du vêtement et des zones de peau non vêtues à l'environnement. La résistance à ce flux de chaleur sèche, I_a dépend de la vitesse de l'air, de la température de surface du vêtement, de la température de l'air et de la température moyenne de rayonnement

$$I_a = 1 / (h_c + h_r)$$

Où :

I_a est la résistance au flux de chaleur sèche

h_c est le coefficient d'échange de chaleur par convection

h_r est le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement

Pour la détermination de l'isolement thermique intrinsèque, I_{cl} , ou pour l'estimation de la perte de chaleur par le corps humain, il est nécessaire de connaître le facteur de surface du vêtement (facteur d'agrandissement), f_{cl} , défini comme le rapport entre la surface du vêtement (parties du corps vêtu), A_{cl} (y compris les parties non recouvertes) et la surface du corps nu, A_{Du} (surface estimée par la formule de Du Bois) (Du Bois et Du Bois, 2000) :

$$f_{cl} = A_{cl} / A_{Du} \quad (f_{cl} \geq 1)$$

Par ailleurs, l'isolement d'une tenue complète, I_{cl} (en m². °C/W ou en Clo) peut également être estimé en utilisant l'équation :

$$I_{cl} = \sum I_{clu}$$

Où I_{clu} est l'isolement thermique des différentes pièces vestimentaires superposées composant la tenue, en mètres carrés degrés Celsius par watt ou en Clo ($m^2 \cdot ^\circ C/W$ ou en Clo).

Toutefois, étant donné que le corps du porte-lance est intégralement couvert par des équipements de protection individuelle, les mains étant gantées, la tête coiffée d'un casque F1, le visage recouvert du masque de l'appareil respiratoire, les mesures réalisées même sur un mannequin thermique ne correspondent qu'à une situation de laboratoire. De plus, la posture accroupie du pompier lors de l'attaque du feu et les mouvements du sujet, qui créent un effet de pompage de l'air à travers le vêtement modifient les surfaces d'échange alors que l'isolement thermique de la tenue ne varie pas.

2.1.4.2. Evaluation de l'isolement thermique des équipements E1 et E2Co

Les mesures de l'isolement ont été effectuées sur le mannequin thermique instrumenté du laboratoire « ergonomie de la protection » du Centre d'Etudes du Bouchet (91). Le mannequin représente un corps humain en grandeur réelle avec des mensurations standardisées. Il est équipé d'un système simulant la production de chaleur et les pertes de chaleur sèche de l'homme.

L'isolement thermique d'un ensemble vestimentaire est mesuré sur le mannequin habillé et placé dans une enceinte thermique régulée. Pour cela, il est nécessaire d'enregistrer la température moyenne de la peau, la perte de chaleur du mannequin, la température de l'air dans l'enceinte thermique régulée. Il est également nécessaire de réaliser une mesure avec le mannequin nu pour déterminer la résistance thermique entre le vêtement et l'environnement (Mc Cullough et al., 1989).

L'énergie fournie aux éléments chauffants est régulée électroniquement à partir de la centrale de contrôle et d'enregistrement de façon à produire une température moyenne de la peau proche de celle de l'homme dans une ambiance thermique stable.

Les conditions de mesures habituelles fixées par la norme précitée sont les suivantes :

Vitesse de l'air : < 1,5 m/s
 Différence entre la température de l'air et la température moyenne de rayonnement : < 0,5 °C
 Humidité relative (régime stable) : environ 40 %
 Température moyenne de la peau du mannequin thermique : 32°C à 34°C.

Les mesures de puissance, de température de la peau et de température de l'air sont combinées pour permettre au logiciel de programmation « LAMA & CEB version 2,8 » (février 2002) développé par le Centre d'Etudes du Bouchet de déterminer l'isolement thermique total, I_T (Clo). Ce logiciel de programmation intègre l'ensemble des équations données par le référentiel normatif ISO 9920 (AFNOR/ISO, 1995) et les méthodes de traitement statistique pour réduire le bruit de fond des capteurs et de ce fait augmenter la précision des mesures.

$$I_T = I_a + I_{cl}$$

Où :

I_T est la résistance du mannequin habillé (en Clo)

I_a est la résistance du mannequin nu (en Clo)

I_{cl} est l'isolement des vêtements (en Clo)

Cinq mesures ont été réalisées sur un mannequin thermique avec la « tenue de base » et avec les équipements d'intervention E1 et E2Co de la figure 2.5 (Warmé-Janville (a), 2002, Warmé-Janville (a), 2003).



Figure 2.5 : Tenue de base (à gauche), Equipement E1 (au centre), Equipement E2Co sur mannequin (à droite) (Photo BSPP)

2.1.4.3. Isolement thermique des équipements E1 et E2Co

Les résultats sont reportés dans les tableaux 2.4 et 2.5.

Tableau 2.4 : Bilan des isolements thermiques pour l'équipement E1

	Isolement (en Clo)		
	Vitesse de l'air 0,5 m/s	Vitesse de l'air 1 m/s	Vitesse de l'air 1,5 m/s
Sous-vêtement MC	0,32 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,25 ± 0,01
Tenue de base	0,55 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,46 ± 0,02
Ensemble d'intervention en cuir	1,19 ± 0,02	1,16 ± 0,02	1,09 ± 0,02
Ensemble d'intervention en cuir avec ARI	1,00 ± 0,02	0,97 ± 0,02	0,94 ± 0,01

Tableau 2.5 : Bilan des isolements thermiques pour l'équipement E2Co

	Isolement (en Clo)		
	Vitesse de l'air 0,5 m/s	Vitesse de l'air 1 m/s	Vitesse de l'air 1,5 m/s
Sous- vêtement MC	0,32 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,25 ± 0,01
Tenue de base	0,55 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,46 ± 0,02
Veste et pantalon en textile	0,78 ± 0,02	0,53 ± 0,02	0,43 ± 0,02
Ensemble d'intervention en textile	1,12 ± 0,02	1,08 ± 0,02	1,04 ± 0,02
Ensemble d'intervention en textile avec ARI	1,06 ± 0,02	1,03 ± 0,02	0,96 ± 0,02

Les mesures d'isolement thermique effectuées montrent que les caractéristiques des deux équipements sont très proches avec des écarts inférieurs à 13%. Ainsi, pour des mesures faites avec une vitesse de l'air allant de 0,5 m/s à 1,5 m/s, l'isolement thermique passe de 1,19± 0,02 Clo à 1,04± 0,01 Clo. Plusieurs constats sont ainsi effectués :

- l'élévation de la vitesse de l'air entraîne une diminution de la valeur de l'isolement thermique ;
- le port de l'ARI avec la répartition de sa masse sur les épaules et le bassin provoque un écrasement des couches d'air entre les vêtements et entraîne une réduction des surfaces d'échange ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la perte de chaleur sèche. Les résultats obtenus donnent une résistance à la perte de chaleur sèche se situant entre 0,96 ± 0,02 Clo et 1,06 ± 0,02 Clo.

Il apparaît que les couches d'air piégées dans les vêtements sont soumises à l'effet des mouvements corporels et à l'effet du vent. Le vent crée une ventilation dans le vêtement par l'air qui pénètre dans les tissus et qui traverse les ouvertures essentiellement au niveau du col, tandis que le mouvement en accroît la circulation interne.

Ces premières constatations issues de mesures sur un mannequin statique, rejoignent les conclusions de Wouter A Lotens (1985), sur ses travaux relatifs aux échanges thermiques à travers les vêtements. La capacité d'isolation des divers types de vêtements dépend largement de leur conception. Plusieurs paramètres de cette conception ont un effet sur l'isolation, à savoir le nombre de couches, les ouvertures, la coupe, la répartition de l'isolation sur le corps et la surface de peau exposée. Certaines caractéristiques du tissu telles que sa perméabilité à l'air, sa réflectivité et les produits dont il est enduit ont également leur importance. Par ailleurs, le vent et l'activité physique modifient cette isolation. Les mouvements corporels et du courant d'air produit par ces derniers, que l'on appelle : « effet de pompage » peuvent ainsi réduire l'isolement thermique résultant de la tenue vestimentaire de 5% à 50% selon le nombre d'ouvertures et la rigidité du textile (AFNOR/ISO, 1995).

Concernant les tissus à couches multiples, on constate qu'un vêtement très isolant est forcément épais, que des effets à couches minces multiples permettent d'obtenir une très bonne isolation, qu'un habit ample isole mieux qu'un vêtement serré, à condition que l'air chaud ne s'engouffre pas entre les couches, et qu'il y a une limite à la capacité d'isolation qui est fonction de la couche d'air adhérent à la peau (Andréas et Rossi, 2005).

L'ensemble textile choisi pour être mis en service à la brigade répond en grande partie aux points précités, d'autant que le harnais du dossard de l'ARI, encore plus que le ceinturon d'intervention, influence doublement les échanges thermiques car tout en freinant la circulation interne, il réduit les entrées d'air chaud, provenant des turbulences du feu, dans les vêtements.

La seule différence significative entre les deux générations d'équipement concerne le poids. Les caractéristiques intrinsèques des deux types de tenues étant très proches les unes des autres. Cette similitude de résultats obtenus s'explique d'une part, par la conformité des deux types de tenues au référentiel normatif (AFNOR, 1995 ; Hocke et al., 1999 ; Schopper-Jochum, 1999), et d'autre part, par la méthode de détermination de ces valeurs avec l'utilisation d'un mannequin statique et, pour certaines mesures, des échantillons d'étoffe et de cuir de 20 cm².

Toutefois, après des essais effectués au porté par les sapeurs-pompiers dans les compagnies d'incendie, il s'avère qu'un sous-vêtement (polo), conçu en fibres hydrophobes, comme par exemple les maillots utilisés lors de la pratique de la course à pied, apporte un meilleur confort. Ce type de polo permettrait au porte-lance d'être plus longtemps sec (Jacques et Chelingue (g), 2005). Après une enquête de satisfaction (cf. Annexe 1), trois nouvelles séries d'essais sont réalisées pour affiner et compléter les données physiques et ergonomiques obtenus avec les équipements E1 et E2Co.

La première série a pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques de prototypes de tricot en textile. Ces nouveaux maillots de corps, qui sont des évolutions du polo F1, sont conçus à partir d'un assemblage de fibres d'origine artificielle comme la viscose et d'origine synthétique comme l'aramide ou le modacrylique. Les échantillons qui présentent les meilleures caractéristiques d'isolement thermique et de perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau, remplaceront le polo F1 dans les équipements E2Co lors des tests sur l'homme à la maison du feu. Ce vêtement s'intitulera le « polo F2 » expérimental et la configuration d'équipements E2Co avec le « polo F2 » expérimental s'intitulera E2.

La seconde série consiste à déterminer l'influence des transferts de sueur à travers différentes configurations de protection vestimentaire. Les observations sont réalisées à partir de mesures sur un mannequin articulé transpirant. Ce type de mannequins, mis au point au milieu des années 1980 (Olesen et coll. 1982 ; Nielsen, Olesen et Fanger 1985, Holmer 1999, Holmer 2004), permet aujourd'hui avec une version évoluée, d'étudier les transferts d'humidité pendant une simulation d'un mouvement de marche.

2.2. Détermination de la résistance à la vapeur d'eau des ensembles d'intervention

L'isolement thermique, la transmission d'humidité et leur interaction influent sur le confort au porté. Suivant les conditions climatiques et la coupe des vêtements, le vent et les mouvements répétitifs peuvent augmenter la transmission de la chaleur et de l'humidité.

Il s'agit d'examiner, avec une température de surface définie à 34°C (température cutanée moyenne), le comportement thermo-physiologique des ensembles vestimentaires, conformément au référentiel normatif (ISO/DIS 13506.2, 2005) et entre autres d'évaluer les résistances thermiques sèche et évaporatoire.

2.2.1. Définition des résistances thermique sèche et évaporatoire

2.2.1.1. Mesures sur mannequin transpirant

Le comportement thermo-physiologique d'ensembles vestimentaire peut-être étudié sur un mannequin capable d'imiter la production de transpiration et de réaliser des mouvements harmonieux correspondant à la marche (Richards et Mattle, 2001 ; Richards et Mattle, 2003 ; Richards et Fiala, 2004). Ce type de mannequin est spécialement conçu pour tester les vêtements de protection de manière réaliste.

Le mannequin SAM (utilisé dans cette étude) reproduit la morphologie humaine et se base sur des données anthropométriques ; ses membres sont mobiles et il est capable de produire de la transpiration. La structure du squelette intérieur – au-dessus duquel SAM est suspendu à un système de pesage – est recouverte de vingt-six segments munis de capteurs de température et pouvant être chauffés individuellement (Figure 2.6). De cette manière, la surface de la peau peut être réglée de façon à produire une température constante ou une puissance de chauffage constante.

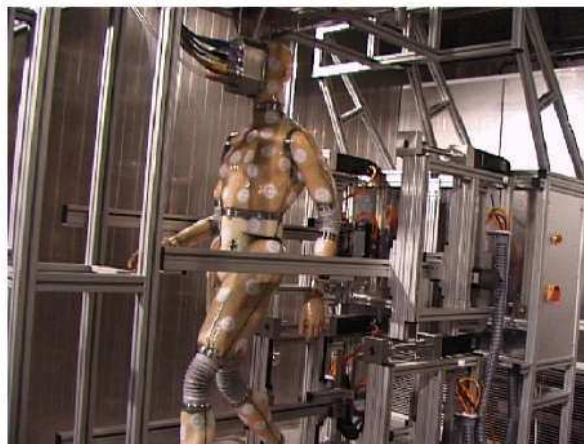


Figure 2.6 : SAM, mannequin articulé thermique (Photo Empa)

Cent-vingt-cinq buses, alimentées en eau distillée à l'aide d'un réservoir, sont réparties sur la surface de chaque segment. Les buses peuvent être activées individuellement, ainsi que leur débit de transpiration. Par le biais de micro-vannes incorporées dans le haut du corps, la transpiration est simulée sous forme de vapeur ou de sueur liquide sur l'ensemble du corps, ou uniquement sur certaines parties sélectionnées, avec des débits compris entre 0 et 1 l/(m².h). La mobilité des bras et des jambes de SAM est assurée par des articulations aux épaules et aux coudes, aux hanches et aux genoux.

Des unités motrices externes commandées par ordinateur sont reliées aux poignets et aux chevilles, leur permettant d'effectuer des mouvements divers (courbes de déplacement). De cette manière, des séquences de mouvements conformes à la réalité peuvent être programmées pour les mesures, en reproduisant sans gradation et jusqu'à une vitesse de 2,5km/h, les mouvements de la marche, de l'escalade ou de la course. (Richards, 2000).

Une attention particulière est prêtée à l'évolution de la puissance de chauffage ainsi qu'aux variations de poids, qui sont enregistrées en continu pendant la durée de l'essai. C'est à partir de la puissance de chauffe et les variations de poids des effets que le système détermine la résistance à la vapeur d'eau, R_e .

2.2.1.2. Isolation thermique sèche R_{ct}

L'isolation thermique sèche totale d'un équipement (donnée par la norme ISO 11092), R_{ct} ou I_{cl} , est la différence entre la résistance thermique R_c mesurée sur le mannequin habillé, et la valeur à vide R_{c0} du mannequin dévêtu.

La résistance thermique sèche est définie selon des conditions de mesure qui se rapprochent des conditions de « porter » sur la peau :

$$R_c = S_{ma} (T_{peau} - T_{air}) / H_c$$

$(T_{peau} - T_{air})$: différence de température entre la peau du mannequin et l'air ambiant (en K).

H_c : puissance fournie au mannequin pour maintenir la température de peau du mannequin à 34°C (en W/m²).

S_{ma} : surface cutanée du mannequin (en m²).

La résistance thermique sèche s'exprime en m² K/W.

2.2.1.3. Résistance évaporatoire R_{et}

La puissance de chauffage moyen lorsque le mannequin est en phase active avec un taux d'évaporation fixé permet de déterminer la résistance évaporatoire, R_{et} selon la norme NF EN 31092. La résistance à la vapeur d'eau mesure l'obstacle au passage de la vapeur d'eau et donc à l'évaporation de la sueur sur la peau, que constitue un composant dans le vêtement.

La résistance évaporatoire totale d'un équipement R_{et} (ISO 11092) est la différence entre la résistance évaporatoire R_e mesurée sur le mannequin habillé, et la valeur à vide R_{e0} du mannequin dévêtu. Elle s'exprime en $m^2 Pa/W$.

$$R_e = S_{ma} (P_{vap_{peau}} - P_{vap_{air}}) / H_e$$

$(P_{vap_{peau}} - P_{vap_{air}})$: différence d'humidité (pression partielle de vapeur d'eau en Pa) entre le mannequin transpirant et l'air ambiant.

H_e : puissance fournie pour maintenir le mannequin à la température cutanée de 34°C (en W/m^2) quand l'eau s'évapore à sa surface.

S_{ma} : surface cutanée du mannequin (en m^2).

2.2.2. Détermination des caractéristiques d'un nouveau sous-vêtement, le « polo F2 » expérimental³.

Il s'agit de déterminer le sous-vêtement présentant un excellent compromis entre la tenue à la flamme, l'isolement thermique, la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau. Ces paramètres sont donc mesurés pour plusieurs sous-vêtements. Afin de pouvoir évaluer les évolutions et mesurer les écarts des échantillons les uns par rapport aux autres, plusieurs indices de base sont définis à partir des caractéristiques d'épaisseur, d'isolement thermique, de la perméabilité à la vapeur d'eau et de la perméabilité à l'air en se référant aux caractéristiques intrinsèques du polo F1 en coton.

La détermination de ces indices, qui sont sans dimension et donc indépendants des unités de mesure, est basée sur une méthode mise au point par le Centre d'Etudes du Bouchet dans le cadre d'une étude menée sur des mesures et des simulations pour la spécification des performances de tenues de protection NRBC (Warmé-Janville (a) et (b), 2005).

2.2.2.1. Indices de confort statique, dynamique et de sécurité thermique

2.2.2.1.1. Indice de confort statique

L'indice de « confort statique » (I_{cs}) est déterminé à partir de l'isolement thermique (I_{th}) et de la perméabilité à la vapeur d'eau (P_{vap}) :

$$I_{cs} = (P_{vap} / P_{vap.réf.}) \times (I_{th.réf.} / I_{th})$$

³ Le polo F1, le tee-shirt, la chemise, maillot de corps ou encore le sous-vêtement sont des appellations différentes pour un même vêtement. Le « polo F2 » expérimental est une évolution du polo F1, avec des caractéristiques définies à la suite des tests.

L'isolement thermique (I_{th}) est mesuré sur le mannequin sec et la perméabilité à la vapeur (P_{vap}) est mesurée sur le mannequin transpirant. Le complément d'indice « réf. » correspond aux mesures $I_{th.réf}$ et $P_{vap.réf}$ obtenues avec le polo F1 de référence, en coton.

2.2.2.1.2. Indice de confort dynamique

L'indice de « confort dynamique » (I_{cd}) utilise l'indice de confort statique (I_{cs}) modulé par la perméabilité à l'air (P_{air}) pour tenir compte des déplacements d'air dans et au travers du sous-vêtement, selon les mouvements de l'utilisateur :

$$I_{cd} = I_{cs} + [(P_{air} - P_{air.réf.}) / P_{air.réf.}]$$

(P_{air}) correspondant à la perméabilité à l'air du sous-vêtement testé.

($P_{air.réf.}$) correspondant à la perméabilité à l'air du polo F1 de référence, en coton.

2.2.2.1.3. Indice de sécurité thermique

L'indice de « sécurité thermique » (I_s) est déterminé à partir de la perméabilité à l'air (P_{air}) et de l'épaisseur du tricot (ep). Cet indice intègre le mode de tricotage du sous-vêtement. La maille aérée, à l'inverse de la maille serrée, favorise l'effet de pompage. Par exemple : un polo double face confectionné en aramide et viscose permettrait le transfert de vapeur d'eau tout en apportant une couche plus isolante vis-à-vis du transfert thermique dû aux flammes. L'indice de sécurité thermique se calcule de la façon suivante :

$$I_{st} = (ep/ep_{réf.}) \times (P_{air}/P_{air.réf.})$$

ep correspondant à l'épaisseur du sous-vêtement testé ;

$ep_{réf.}$ correspondant à l'épaisseur du polo F1 de référence, en coton.

Pour que la notation retenue soit facilement interprétable, chacun de ces indices élémentaires est égal à 1 pour les caractéristiques équivalentes à celles du polo F1 de référence, inférieur à 1 si le nouveau sous-vêtement est moins performant, et supérieur à 1 s'il est meilleur.

Il convient toutefois de noter que lorsque le porte-lance est muni de l'ARI, la circulation de l'air entre le polo F1 et la veste d'intervention est très faible voire nulle, ce qui réduit considérablement les échanges par convection.

Par contre, en phase de récupération, lorsque l'appareil respiratoire est déposé et que la veste d'intervention est entrouverte ou retirée, la circulation de l'air à travers le sous-vêtement accélère le refroidissement du porte-lance.

2.2.2.2. Méthodologie

Les tests sont réalisés au Centre d'Etudes du Bouchet dans des conditions identiques à celles mises en œuvre pour déterminer les caractéristiques intrinsèques des équipements E1 et E2Co, sur un mannequin transpirant thermique (Figure 2.7).

La méthode de mesures et les outils utilisés sont identiques à ceux présentés au paragraphe 2.1.4.2. et rejoignent ceux appliqués par Andréas (Andréas et Rossi, 2005) lors de ses travaux sur la détermination de vêtements fonctionnels dans le cadre de la thermorégulation d'un athlète.

Cinq mesures ont été réalisées dans des conditions de vitesse de vent de 0,5m/s.



Figure 2.7 : Mannequin équipé d'un polo F1 ML de référence (à gauche), d'un échantillon MC (au centre), d'un échantillon ML (à droite) (Photos CEB)

2.2.2.3. Choix des échantillons

Vingt-six effets avec des manches longues (ML) et des manches courtes (MC) sont sélectionnés parmi quarante échantillons mis à disposition par des fabricants de sous-vêtements (polos) pour sapeurs-pompiers. Le choix de ces échantillons s'est orienté vers des matières naturellement hydrophobes et, en raison des risques thermiques auxquels le porte-lance peut être soumis, les polyester sont écartés (Farnworth, Dohlan, 1985 ; Jacques, Warmé-Janville, Chelingue (a) et (b), 2006).

2.2.2.4. Perméabilité à la vapeur, indices de confort statique, dynamique et de sécurité thermique des différents polos testés

Les résultats des mesures pour les effets à manches courtes et ceux à manches longues figurent respectivement dans des tableaux 2.6 et 2.7.

Tableau 2.6 : Mesures réalisées sur seize échantillons de sous-vêtements à manches courtes.

N° d'essais	Epaisseur (ep) (mm)	Isolement en Clo (torse) (Ith)	Perméabilité à la vapeur (Pvap) (g/m ² /h)	Perméabilité à l'air (Pair) (l/m ² /s)
Réf. MC ⁴	<u>1</u>	<u>0,3</u>	<u>346 ± 16,5</u>	<u>378 ± 54</u>
13	1	0,28	349 ± 7,3	1340 ± 79
7	1,21	0,28	350 ± 6,8	1710 ± 21
14	0,62	0,27	354 ± 4,8	1560 ± 36
12	1,03	0,29	382 ± 5,6	1730 ± 38
17	1,07	0,39	342 ± 17,3	2440 ± 55
26	1,02	0,31	345 ± 10,0	1493 ± 40
2	1,26	0,32	298 ± 8,7	1770 ± 24
18	0,95	0,36	354 ± 17,2	1660 ± 20
22	0,89	0,35	352 ± 6,2	622 ± 51
21	1,02	0,36	363 ± 10,1	830 ± 33
3	1,01	0,27	305 ± 7,9	2060 ± 34
8	1,16	0,31	355 ± 4,5	1600 ± 62
9	0,91	0,3	341 ± 4,5	1910 ± 32

Tableau 2.7 : Mesures réalisées sur douze échantillons de sous-vêtements à manches longues.

N° d'essais	Epaisseur (ep) (mm)	Isolement en Clo (torse) (Ith)	Perméabilité à la vapeur (Pvap) (g/m ² /h)	Perméabilité à l'air (Pair) (l/m ² /s)
Réf. ML ⁵	<u>0,85</u>	<u>0,32</u>	<u>352 ± 11,8</u>	<u>551 ± 20</u>
24	0,95	0,3	352 ± 9,7	1692 ± 25
19	0,69	0,31	376 ± 11,4	2120 ± 52
25	0,88	0,29	369 ± 13,1	1458 ± 25
23	0,53	0,28	359 ± 11,6	1470 ± 37
11	0,62	0,31	429 ± 11,4	1640 ± 65
10	0,87	0,29	431 ± 6	1420 ± 48
4	0,71	0,29	353 ± 10,4	382 ± 23
6	1,34	0,36	346 ± 8,7	2390 ± 48
16	0,89	0,34	343 ± 8,6	1500 ± 14
5	1,29	0,34	362 ± 16,3	929 ± 41
15	1,19	0,37	403 ± 11,1	1290 ± 19

⁴ Réf. MC est l'échantillon de référence, il s'agit du polo F1 en coton, à manches courtes

⁵ Réf. ML est l'échantillon de référence, il s'agit du polo F1 en coton, à manches longues

Afin d'interpréter ces résultats, les tableaux 2.8 et 2.9 présentent les indices de confort statique, de sécurité thermique et de confort dynamique pour les échantillons à manches courtes et à manches longues.

Tableau 2.8 : Indices de confort statique, de sécurité thermique et de confort dynamique de sous-vêtements à manches courtes.

N° d'essais	Indice de confort statique (Ics)	Indice de sécurité thermique (Ist)	Indice de confort dynamique (Id)
Réf. MC	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
12	1,14	4,7	4,7
14	1,14	2,6	4,3
7	1,08	5,5	4,6
13	1,08	3,5	3,6
9	0,99	4,6	5
8	0,99	4,9	4,2
3	0,98	5,5	5,4
26	0,97	1,4	1,1
21	0,87	2,2	2,1
22	0,87	1,5	1,5
18	0,85	4,2	4,2
2	0,81	5,9	4,5
17	0,76	6,9	6,2

Tableau 2.9 : Indices de confort statique, de sécurité thermique et de confort dynamique de sous-vêtements à manches longues

N° d'essais	Indice de confort statique (Ics)	Indice de sécurité thermique (Ist)	Indice de confort dynamique (Id)
Réf. ML	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
10	1,35	2,6	2,9
11	1,26	2,2	3,2
23	1,17	1,7	2,8
25	1,16	2,7	2,8
4	1,11	0,6	0,8
19	1,1	3,1	3,9
24	1,07	3,4	3,1
15	0,99	3,3	2,3
5	0,97	2,6	1,6
16	0,92	2,8	2,6
6	0,87	6,8	4,2

2.2.2.5. Définition des caractéristiques techniques du « polo F2 » expérimental

En s'appuyant sur les indices obtenus, et bien que ceux-ci soient proches les uns des autres, un référentiel technique est élaboré pour le sous-vêtement MC. Il précise en outre que l'isolement thermique de l'effet doit être proche de 0,28 Clo pour une vitesse de l'air de 0,5 m/s, que sa perméabilité à la vapeur d'eau doit être comprise entre 349 g/m²/h à 382 g/m²/h et que la perméabilité à l'air doit être comprise entre 1340 l/m²/s et 1730 l/m²/s, ce qui représente respectivement un gain maximal de 36 g/m²/h et de 1352 l/m²/s par rapport au polo F1 MC en coton (Chelingue (b), 2006).

Un second référentiel technique est élaboré pour les sous-vêtements ML. Il précise que l'isolement thermique de l'effet doit être proche de 0,30 Clo, que sa perméabilité à la vapeur d'eau doit être comprise entre 352 g/m²/h à 431 g/m²/h et que la perméabilité à l'air doit être comprise entre 1420 l/m²/s et 2120 l/m²/s, ce qui représente respectivement un gain maximal de 79 g/m²/h et de 1569 l/m²/s par rapport au polo F1 ML en coton (Chelingue (b), 2006).

Les essais réalisés sur les sous-vêtements ont montré que plusieurs échantillons présentaient des caractéristiques d'isolement et de perméabilité meilleures que le polo F1 MC et ML (Jacques, Warmé-Janville, Chelingue, 2007 ; Inzé, 2006). A partir de ces premiers résultats, des mesures comparatives sur la détermination de la résistance à la vapeur d'eau à partir d'un mannequin articulé transpirant et, sur le comportement au feu de différentes configurations de tenues d'intervention complètes, sont lancées.

Ces échantillons sont dénommés dans la suite de ce travail, « polo F2 » expérimental.

2.2.3. Evaluation des résistances thermique sèche et évaporatoire des ensembles E1, E2, E2Co et E3 sur mannequin transpirant articulé

Les essais qui sont réalisés sur SAM, présentent l'intérêt de pouvoir étudier l'influence des mouvements par effet de pompage, sur les transferts de chaleur et de sueur à travers les protections vestimentaires.

2.2.3.1. Méthodologie

Avant chaque essai le mannequin est revêtu d'une couche hydrophile (2^e peau) pour améliorer la répartition de l'humidité sur le corps (Figure 2.8, à gauche) puis vêtu des équipements à évaluer (Figure 2.8).



Figure 2.8 : Mannequin SAM, revêtu d'une couche hydrophile (Photos Empa)

L'échantillon est testé en deux phases, selon la méthode prescrite par la norme relative à la détermination de la résistance à l'évaporation (ISO/DIS 13506.2, 2005).

La première phase (Phase 1) est une phase d'acclimatation qui permet d'amener SAM à une température cutanée uniforme de 34°C et égale à la température corporelle périphérique humaine. La durée de chauffe est fixée à trente minutes avec une vitesse de vent de 1 m/s. La résistance thermique sèche R_{ct} de la tenue vestimentaire est déterminée lors de cette phase conformément à la norme ISO 11092.

La deuxième phase (Phase 2) est une phase active qui permet de déterminer la résistance effective à la vapeur d'eau R_{et} . Elle dure soixante minutes à une température constante de 34°C et au taux de transpiration liquide de 600 g/h, avec une vitesse de vent de 1 m/s.

Les essais sur SAM ont été conduits dans les conditions citées ci-après fixées par la norme ISO/DIS 13506.2.

Nombre de buses de transpiration : 125 buses.

Équipement : SAM, balance, appareils et logiciel d'évaluation.

Température dans la chambre climatique : neutre (20°C et 65% d'humidité relative).

Durée d'un essai : 90 minutes.

Durée d'un cycle : 1 minute.

Puissance de chauffage (sans chauffage des éléments de garde) : variable.

Débit de transpiration liquide : 600 g/h.

État des échantillons : conditionnés au climat requis pour les essais durant au moins 8 heures.

Nombre de mesures par configuration : 3.

Vitesse du vent, à l'horizontale (soufflerie) : 1 m/s.

Par ailleurs, dans le cadre de ces essais, seules les parties actives (en rouge sur la Figure 2.9) sont chauffées et transpirantes.

Les parties inactives qui correspondent aux extrémités du corps et aux articulations sont uniquement chauffées et ne sont pas équipées de capteurs de transpiration.

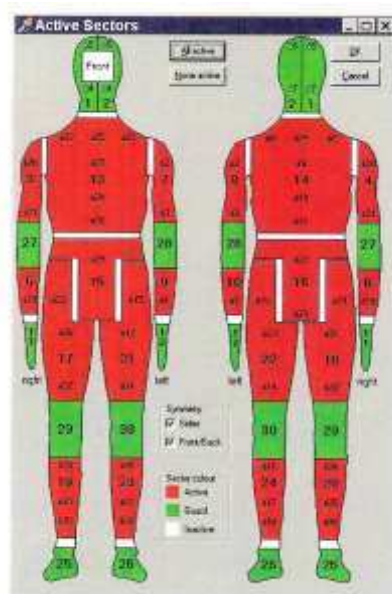


Figure 2.9 : Parties actives (rouges) et inactives (vertes)

Les mesures de résistances thermique sèche et évaporative sont réalisées à l'Empa, un institut de recherche en science des matériaux et en technologie, implanté à St-Gallen (Suisse), sur SAM dont la description a été faite au paragraphe 2.3.1.

2.2.3.2. Equipements évalués

Pour ces mesures, le mannequin transpirant porte différentes configurations des tenues des anciennes et nouvelles générations, ainsi que des vêtements expérimentaux qui sont des évolutions mises au point par les industriels du textile et qui pourraient, selon les résultats obtenus, être mis en service en complément ou en remplacement des équipements actuellement en service.

Les effets expérimentaux concernent essentiellement les vêtements en textile. Ainsi, deux configurations de la tenue E2Co sont évaluées : la première avec un polo F1 MC (E2Co), la seconde avec l'un des sous-vêtements MC correspondant aux caractéristiques du « polo F2 » expérimental définies lors des essais précédents. L'ensemble vestimentaire en textile avec le « polo F2 » expérimental est dénommé E2.

Six configurations sont testées lors de ces essais :

- l'ensemble vestimentaire E1, en position statique (E1) ;
- l'ensemble vestimentaire E2 avec le polo F1, en position statique (E2Co stat) ;
- l'ensemble vestimentaire E2 avec le polo F1, en position dynamique (E2Co dyn) ;
- l'ensemble vestimentaire E2 avec un « polo F2 » expérimental, en position statique (E2) ;
- l'ensemble vestimentaire E2 en remplaçant le pantalon F1 par un caleçon long en aramide/viscose conçu avec les mêmes fibres que le « polo F2 » expérimental, du sur-pantalon par un sur-pantalon en multicouches dont une membrane imper-respirante, du polo F1 par un « polo F2 » expérimental, des gants en cuir par des gants en textile. L'évolution de cette tenue E2, testée en position statique est dénommée E3 ;
- l'ensemble vestimentaire E3, en position dynamique (E3 dyn).

L'objectif des tests dynamiques est d'analyser l'influence du mouvement (une simulation de marche) par effet de pompage, sur le transfert de vapeur d'eau (transpiration) à travers les couches des différentes configurations de vêtement.

2.2.3.3. Résistances thermiques sèches et résistances à la vapeur d'eau des différents équipements testés

La figure 2.10 présente les résultats de la phase 1 des tests réalisés avec les cinq configurations de textiles. Le but de cette série de mesures étant d'analyser l'influence du port du « polo F2 » expérimental, du sur-pantalon en multicouches avec membrane sur un mannequin statique, puis sur un mannequin en mouvement, aucune mesure n'a été réalisée avec l'équipement E1.

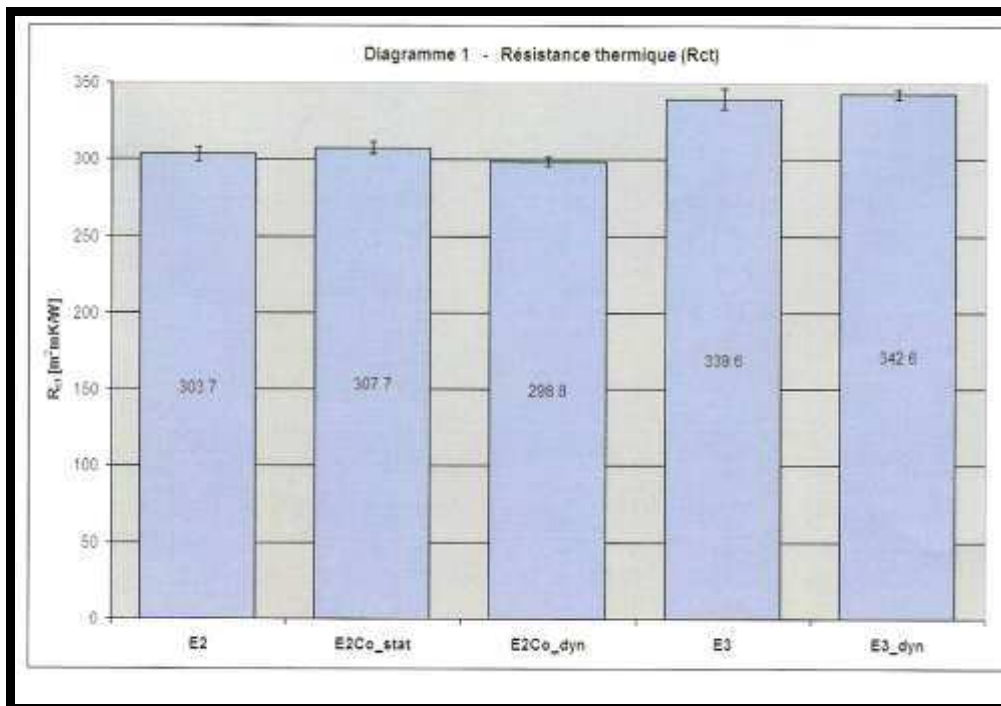


Figure 2.10 : Résistance thermique sèche pour les configurations de tenues textiles

Ces mesures confirment les résultats obtenus lors de la détermination de l'isolement sur le mannequin thermique du Centre d'Etudes du Bouchet (Tableau 2.5) pour l'équipement E2Co.

Les écarts entre les résultats avec la configuration comprenant le polo F1 (E2Co stat) et celle avec le « polo F2 » expérimental (E2), sont inférieurs à 1,5% et ne sont donc pas significatifs. De plus, la différence de résistance thermique sèche entre le mannequin en mouvement et le mannequin statique (E2Co dyn et E2Co stat ou E3 dyn et E3) est faible et inférieure à 3%.

Ces différences entre les configurations montrent que l'effet de pompage produit par le mouvement n'est pas efficace, notamment en raison des modes de fermetures des effets de type « velcro » aux poignets et au col et, du recouvrement des bottes par le sur-pantalon. De plus, l'inefficacité de l'effet de pompage réduit d'une part, la convection et l'échange d'air depuis l'intérieur de l'équipement avec l'environnement et, d'autre part, et de manière significative, la perte de chaleur qui en résulte. Enfin, il est constaté que le port du sur-pantalon multicouche avec une membrane augmente la résistance thermique sèche. Un écart d'environ 12% est observé entre la configuration E2 et E3. On notera que plus la résistance thermique est élevée, plus l'isolation est importante et plus le vêtement conserve la chaleur.

2.2.3.4. Chaleur totale perdue et résistance à la vapeur d'eau, R_e

La figure 2.11 présente la puissance de chauffage moyenne atteinte après 10 minutes lors des phases 1 et 2 avec les configurations de tenue en textile. Cette puissance de chauffage correspond à l'énergie nécessaire afin que le mannequin SAM maintienne sa température cutanée constante à $34,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

Toutefois, étant donné que la surface cutanée de SAM est d'environ $1,10 \text{ m}^2$ (secteurs de garde et tête exclus) et que celle du corps d'un homme adulte de type européen est d'environ $1,80 \text{ m}^2$, la puissance de chauffage obtenue est environ égale aux deux-tiers de la chaleur perdue par le corps de l'homme adulte portant ces différentes configurations de tenue dans les mêmes conditions de test.

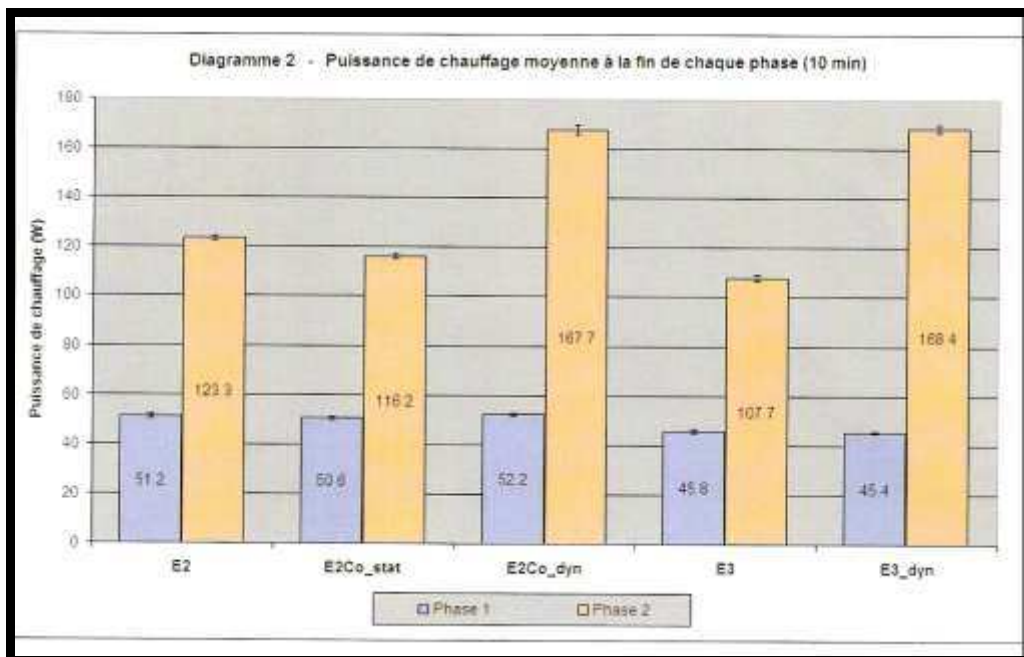


Figure 2.11 : Puissance de chauffage moyenne après dix minutes de chauffe pour les différentes configurations de tenue textile et pour les deux phases

En comparant la puissance de chauffage des phases 1 et 2, on note qu'avec la sudation (phase 2), l'énergie nécessaire au maintien d'une température cutanée constante, augmente généralement deux à trois fois. Ce constat permet de mettre en évidence la respirabilité et l'efficacité qui résultent du refroidissement par évaporation des différentes configurations d'équipement testées. En mode statique, on observe un écart d'environ 6% entre les configurations E2 et E2Co stat, cela se traduit par une différence équivalente entre la résistance évaporative des deux configurations et donc un écart entre les polos F1 et « F2 » expérimental.

Comme l'isolement thermique R_{ct} est sensiblement identique pour les deux configurations, cette différence entre les puissances totales de chauffage est entièrement due au refroidissement par évaporation, ce qui démontre que l'efficacité totale de refroidissement est affectée par le type de sous-vêtement utilisé. Cette augmentation de puissance qui est égale à 7 W (équivalent à environ 11 W pour un homme adulte), se traduit donc par une efficacité de refroidissement de 11 W plus élevée pour le pompier vêtu d'un « polo F2 » expérimental. A configuration équivalente (E2Co stat et E2Co dyn ou E3 et E3 dyn), les écarts sont supérieurs à 35% selon que le mannequin est statique ou en mouvement.

La puissance de chauffage passe ainsi de 116 W pour la configuration E2Co stat à 168 W pour la configuration E2Co dyn, soit une efficacité de refroidissement de plus de 80 W plus élevé pour le pompier en mouvement. Avec les configurations E3 et E3 dyn, cette efficacité de refroidissement est même proche de 60 W en phase de marche.

En phase statique, on note que la résistance évaporatoire (Figure 2.12) est plus importante pour une configuration qu'avec un sous-vêtement long en aramide viscosse et un sur-pantalon en multicouches avec une membrane imper-respirante (E3), que pour la configuration avec un pantalon F1 et le sur-pantalon (E2).

En phase dynamique la résistance évaporatoire est similaire pour les configurations E2Co dyn et E3 dyn. Les résultats obtenus confirment le rôle des mouvements et l'importance de l'effet de pompage sur le transfert d'humidité à travers les couches de vêtements. Enfin, on observe que l'effet de pompage atténue les écarts entre les caractéristiques intrinsèques de perméabilité à la vapeur des sous-vêtements (polos, caleçon et pantalon F1).

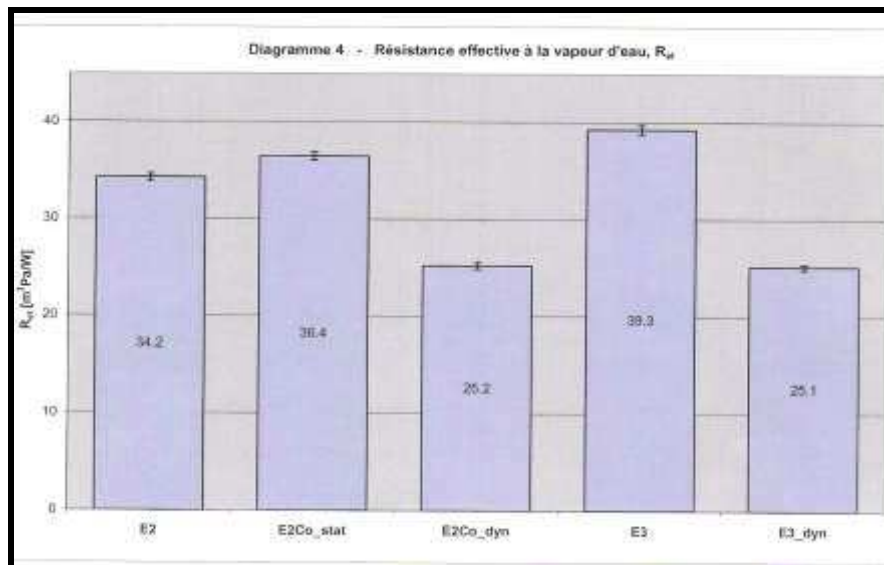


Figure 2.12 : Résistance évaporatoire pour les configurations de tenue textile après une durée de chauffe de dix minutes

On peut en conclure qu'aucun échange significatif d'air entre le microclimat (air dans le vêtement) et l'environnement n'est mis en évidence en phase statique. C'est le mouvement de marche qui favorise l'évaporation à travers le vêtement et les ouvertures aux extrémités. Le mouvement répété des membres provoque une circulation d'air à l'intérieur du vêtement entre les différentes parties du corps et entre les différentes couches, ceci engendrant une répartition plus homogène de l'humidité à l'intérieur du vêtement et génère une perte de sueur moins importante par ruissellement. Il est toutefois à noter, que ces tests ont été réalisés dans un environnement neutre avec une température de l'air de 20°C et une humidité relative de l'air de 65%, ce qui ne correspond pas à une ambiance de feu.

2.2.3.5. Accumulation de l'humidité dans les vêtements

La réalisation d'essais avec un mannequin thermique transpirant se traduit par le stockage d'une quantité d'eau dans les différents vêtements portés. La figure 2.13 montre la quantité d'humidité accumulée dans chaque couche effet d'habillement dans les différentes configurations de la tenue en textile. Les résultats obtenus permettent d'estimer d'une part, l'efficacité de l'effet de pompage issu des mouvements du mannequin, notamment en mesurant le volume d'eau égouttée et, d'autre part, la perméabilité à la vapeur d'eau intrinsèque des effets des différentes configurations choisies.

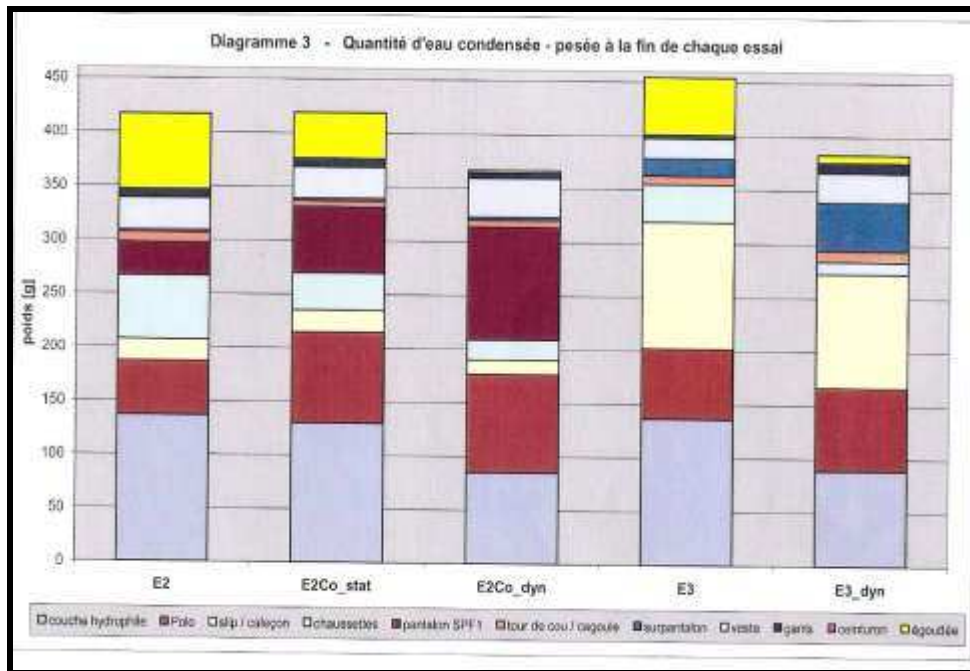


Figure 2.13 : Quantité d'eau condensée dans les différents effets d'habillement

Les relevés d'humidité ont été réalisés pour le ceinturon et pour les huit couches de vêtements. L'humidité sur le corps (couche hydrophile) et l'eau égouttée du corps et répandue sur le sol ont également été mesurées.

A partir de la quantité d'eau pesée dans chaque effet vestimentaire, on observe que la quantité totale d'eau condensée dans les configurations avec le mannequin en mouvement est d'environ 12 à 16% moins importante que celle stockée dans les équipements portés par le mannequin statique. Lors des tests statiques entre quarante et soixante-dix grammes d'eau égouttés sont répandus sur le sol, cette quantité qui est de six à dix fois plus importante que lors des tests dynamiques, ne participe pas au refroidissement du mannequin. Elle ruisselle sur la couche hydrophile sans absorber de calories.

Par ailleurs, l'humidité stockée dans le polo en coton (E2Co stat ou E2Co dyn) est supérieure à celle stockée dans le maillot en aramide/viscose (E2 ou E3). Ceci était prévisible car le polo F1, en coton, est hygroscopique, c'est-à-dire que l'humidité absorbée par les fibres provoque leur gonflement, contrairement au vêtement en aramide/viscose. De plus, comme l'aramide-viscose sèche plus vite que le coton, le volume global d'humidité absorbée par le maillot en coton est nettement supérieur à celui absorbé par l'effet en aramide/viscose. Ainsi, moins d'humidité est disponible pour le refroidissement de la peau par évaporation avec le polo en coton que pour celui de type « polo F2 » expérimental, comme mentionné précédemment.

Un écart d'environ 40% est observé entre la quantité d'eau condensée dans le « polo F2 » expérimental, le slip, les chaussettes et le pantalon F1 de la configuration E2 et le « polo F2 » expérimental, les chaussettes et le caleçon long en aramide/viscose de la configuration E3. Avec plus de 155 grammes d'humidité stockée, le caleçon long est le vêtement qui conserve la quantité d'eau la plus importante lorsque le mannequin est en position statique. Avec un mouvement de marche cette quantité passe à environ 110 grammes (E3 dyn). Ce volume est alors identique à celui stocké dans le pantalon F1 en Kermel de la configuration E2Co dyn.

Des observations similaires sont faites pour le stockage d'eau dans les chaussettes où le mouvement du mannequin réduit par trois la quantité d'eau retenue dans les chaussettes.

Enfin, quelle que soit la configuration testée, il y a moins de 90 grammes d'eau condensée dans le sur-pantalon, la veste d'intervention, la cagoule, le ceinturon et les gants (Chelingue (a), 2006).

En conclusion, les mouvements, en créant un effet de pompage, accélèrent le transfert de vapeur d'eau et donc de la sueur à travers les différentes couches de vêtements. Parmi ces habits, le polo de type « F2 » expérimental permet d'obtenir un meilleur refroidissement qu'un sous-vêtement en coton (polo F1) qui stocke d'avantage l'humidité. Celle-ci peut alors, en cas de conditions thermiques extrêmes se transformer en vapeur et provoquer des brûlures pour le porte-lance. Lorsque le mannequin porte un pantalon F1 sous le sur-pantalon, on constate qu'un important volume de sueur est absorbé par le pantalon F1, par contre lorsque le sujet porte un caleçon long sous le sur-pantalon, ce dernier stocke jusqu'à quarante-cinq grammes d'eau sans doute en raison de la présence d'une membrane.

A partir des différentes figures et en tenant compte des volumes d'eau absorbée par les différents effets d'habillement, le meilleur compromis se composerait d'un « polo F2 » expérimental, d'un pantalon F1 et d'un ensemble textile avec un sur-pantalon sans membrane. Ces différentes séries de tests confirment les résultats d'une étude menée sur l'évaluation du confort thermique et de la protection contre la chaleur de vêtements de protection pour les sapeurs-pompiers volontaires suisses (Rossi et al., 2005). Lors de cette recherche, l'importance de l'influence des sous-vêtements sur la transmission de la chaleur et de l'humidité a été mise en évidence. Ainsi, l'efficacité du rafraîchissement par évaporation de la sueur dépend en grande partie des propriétés hydrophiles et hygroscopiques des sous-vêtements, mais également des propriétés physiologiques et de la coupe des vêtements de protection.

Dans l'optique d'une bonne évaluation des propriétés thermophysiques d'un système, il est essentiel d'évaluer l'ensemble des équipements, car les couches de vêtements peuvent agir l'une sur l'autre et influencer sur la transmission d'humidité.

Chapitre 3.

Comportement et réaction au feu des équipements de protection

-
- 3.1. Comportement des équipements soumis à un flux thermique modéré
 - 3.2. Comportement des équipements soumis à un flash thermique
-

La troisième série d'essais comporte deux parties qui s'inscrivent chacune dans une logique spécifique d'étude du comportement des équipements au feu.

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer l'impact sur les différents types d'équipements d'un flux thermique de 5 et de 10 kW/m² auquel le sapeur-pompier peut être confronté lors d'un feu de chambre classique, ces flux correspondent à un flux thermique moyen pouvant être rencontré lors des premières minutes un feu d'appartement (Hoschke, 1981).

Dans un second temps, il s'agit d'analyser le comportement au feu des différents types de vêtements de protection soumis à un flash thermique. Ce scénario qui ne correspond certes pas aux conditions habituelles de l'engagement du porte-lance, représente une situation d'accident thermique de type embrasement généralisé éclair durant lequel le flux thermique peut atteindre 80kW/m² (DDSC, 2003).

3.1. Comportement des équipements soumis à un flux thermique modéré

Dans le cadre général de la lutte contre le feu, le porte-lance qui n'est pas au contact de la flamme et qui dispose d'une lance à eau, se situe à une distance dite de sécurité par rapport aux flammes. Pour reproduire cette situation et pour analyser le comportement au feu des équipements de protection face à des risques thermiques modérés, des tests sont réalisés avec un mannequin instrumenté placé devant une source de chaleur radiante, selon un protocole expérimental d'essai (Figure 3.1). Lors de ces tests, aucune protection du mannequin à l'aide d'un moyen d'extinction n'est réalisée.

3.1.1. Protocole expérimental

Les essais sont réalisés à l'Empa, sur le mannequin thermique « Henry » qui a la stature d'un homme adulte (Figure 3.1). Pour les différentes mesures, « Henry » est revêtu de la tenue à tester, puis exposé dans une chambre de combustion, en laboratoire, à une source radiante dont le flux thermique et la durée sont sous contrôle permanent.

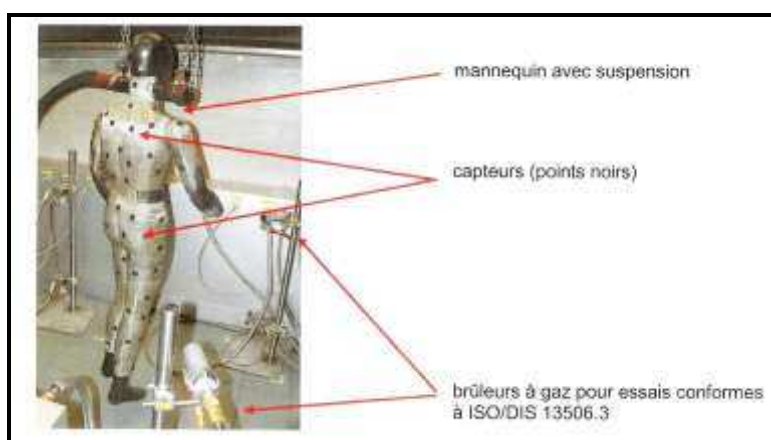


Figure 3.1 : Mannequin « Henry » avec capteurs de température et de flux thermique dans la chambre de combustion (Photo Empa)

Le mannequin est équipé de cent vingt-deux capteurs de flux thermiques répartis sur tout le corps, à l'exception des mains et des pieds.

La posture du mannequin correspond à celle d'un homme qui marche avec la partie supérieure du corps légèrement penchée sur la droite et la jambe gauche avancée vers la source de chaleur. De ce fait, seuls quarante neuf des cent vingt deux capteurs sont alignés parallèlement à la source de chaleur radiante, et sur la face avant du mannequin « Henry ».

Certains de ces capteurs, notamment ceux du torse, sont étroitement et constamment en contact avec les vêtements portés, d'autres dans la zone abdominale, sont séparés du vêtement par des couches d'air.

La chaleur diffusée à travers le vêtement, pendant et après l'essai, est mesurée à l'aide des capteurs de flux thermique. Un logiciel évalue les différents degrés de brûlures causées par la chaleur, ainsi que la surface des zones brûlées en fonction de la couche de peau et du degré de brûlure, conformément à la norme ISO/DIS 13 506.3 (2005).

Les essais sont réalisés conformément aux prescriptions de la norme précitée en deux phases. Lors de la première phase, le mannequin est soumis à un flux thermique de 5 kW/m² pendant deux cent quarante secondes.

Lors de la deuxième phase, les sous-vêtements des configurations testées, sont humidifiés. Les équipements sont ensuite soumis à 5 kW/m² pendant deux cent quarante secondes puis, 10 kW/m² pendant cent vingt secondes. Cela peut correspondre à un feu de chambre avec une propagation aux pièces mitoyennes.

Au préalable, les équipements ont été conditionnés pendant vingt quatre heures à 20 ± 2°C et 65 ± 5% d'humidité relative.

La figure 3.2 représente l'implantation des capteurs activés sur le mannequin pendant les essais.

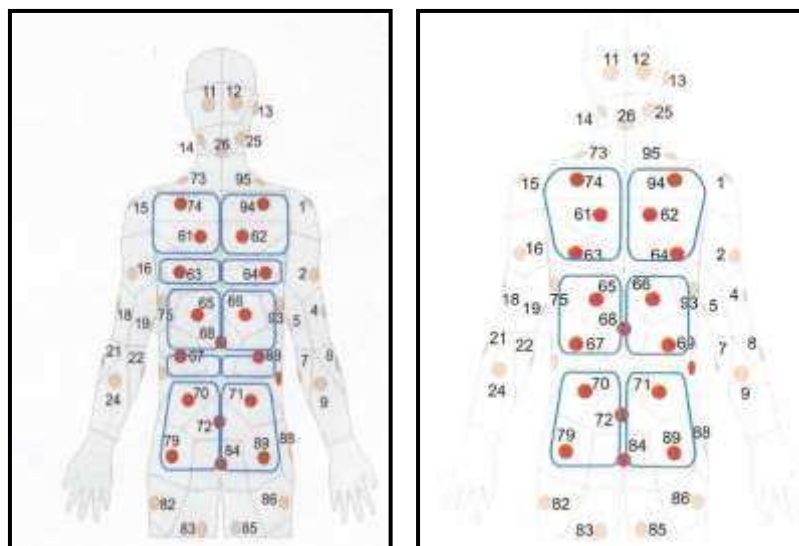


Figure 3.2 : Répartition des capteurs sur le mannequin (1^{ère} phase à gauche, 2^{ème} phase à droite)

Ces capteurs sont regroupés en aires conformément au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Disposition des capteurs dans les différentes aires lors des deux phases

Aire	Capteurs Phase 1	Capteurs Phase 2	Description
1	61 et 74	61, 63 et 74	Haut du torse, à droite
2	62 et 94	62, 64 et 94	Haut du torse, à gauche
3	63	-	Bandes réfléchissantes droite
4	64	-	Bandes réfléchissantes gauche
5	65 et 68	63, 65, 67 et 68	Bas du torse, à droite
6	66 et 68	64, 66, 68 et 69	Bas du torse, à gauche
7	67	-	Ceinture, droite
8	69	-	Ceinture, gauche
9	70 ; 72 et 79	70 ; 72 et 79	Abdomen à droite
10	71 ; 72 et 89	71 ; 72 et 89	Abdomen à gauche

Lors de la deuxième phase, les capteurs 63, 64, 67 et 69 ont été répartis dans d'autres aires, pour éviter que les valeurs d'émissivité données par les capteurs soient faussées en raison de leur recouvrement par la bande réfléchissante et par le ceinturon.

Le mannequin est exposé à une source de chaleur radiante (Figure 3.3) composée d'un panneau radiant formé par des résistances électriques. Un flux thermique d'une intensité maximale de 10 kW/m² peut être atteint lors de ces essais.



Figure 3.3 : Source de chaleur radiante (Photo Empa)

Parallèlement aux mesures de flux thermiques, une caméra à infrarouge (IR) du type : FLIR Thermovision A 40 M, enregistre, à raison de douze images par minute, la température à la surface de la combinaison testée comme le montre à titre d'exemple la figure 3.4.



Figure 3.4 : Températures mesurées avec la camera thermographique (Photo Empa)

L'efficacité d'un vêtement de protection en tant que bouclier thermique peut être ainsi évaluée sur la base des données de température et de flux thermique enregistrées par les capteurs du mannequin.

Les données sont collectées grâce à un logiciel spécialement développé par l'Empa et capable de recueillir et d'enregistrer les activités des capteurs et de calculer les différentes zones brûlées, ainsi que les degrés de brûlure (matériel utilisé : DaqBook 200 (IOTech, USA)).

3.1.2. Tenues soumises aux essais à chaleur radiante

Lors de la première phase, trois tests sont réalisés avec les configurations de protection E1, E2 et E3, afin de déterminer l'impact d'un flux thermique de 5 kW/m² pendant deux cent quarante secondes. Ces tests sont réalisés sur le mannequin sec.

Lors de la deuxième phase, seules les configurations E2Co et E3 sont testées. Les équipements sont d'abord soumis à un flux thermique de 5 kW/m² pendant deux cent quarante secondes, puis à un flux thermique de 10 kW/m² pendant cent vingt secondes. Pendant cette deuxième phase, les sous-vêtements portés par le mannequin sont humidifiés afin de reproduire la transpiration et, l'augmentation du flux thermique simule une extension du feu.

Il faut noter qu'un rabat recouvre la fermeture éclair, et souvent des poches ou les marquages créent une couche supplémentaire au-dessus des capteurs, ce qui influence l'évolution de la température. Le ceinturon d'intervention, selon qu'il est porté ou non, peut également influencer sur les températures abdominales et sur la couche d'air isolante entre les différents vêtements.

3.1.3. Résultats des mesures pour un flux de 5 kW/m²

3.1.3.1. Mesures des températures surfacique et du mannequin

La figure 3.5 indique les moyennes de température atteintes après trois tests, sur la face extérieure de chacune des configurations testées.

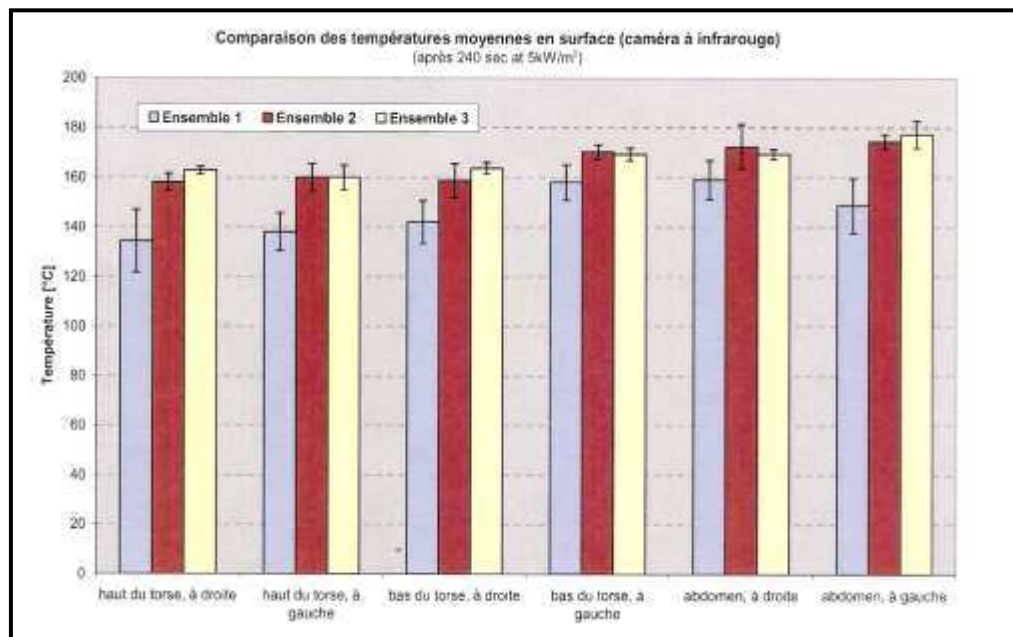


Figure 3.5 : Température moyenne en surface

La température moyenne atteinte sur le « veston de peau » (E1) est moins élevée que celle à la surface d'une veste en textile (E2 et E3) probablement en raison de l'évaporation lente de l'humidité naturelle du cuir qui consomme une partie de l'énergie reçue par la tenue.

Alors que la température de surface est essentiellement liée au taux d'échange thermique défini par les propriétés de la surface (inertie thermique du vêtement) la température intérieure se rattache essentiellement aux propriétés de transfert thermique des couches du vêtement et notamment à la répartition de l'air entre ces différentes couches.

La température à la surface est également affectée par les propriétés thermiques des couches du vêtement, puisque l'énergie du flux thermique incident qu'absorbe le vêtement est également propagée vers l'intérieur, en fonction de la conductivité et de la capacité thermique des couches textiles traversées.

La figure 3.6 présente les températures mesurées sur le mannequin. Du fait des incertitudes sur les mesures, les écarts entre les différentes configurations ne sont pas significatifs.

Néanmoins, en raison du poids des vestes, les couches d'air entre les habits ont tendance à être écrasées, de ce fait, l'augmentation de la température enregistrée est plus importante au niveau des épaules et de la poitrine du mannequin, qu'elle ne l'est au niveau de l'abdomen.

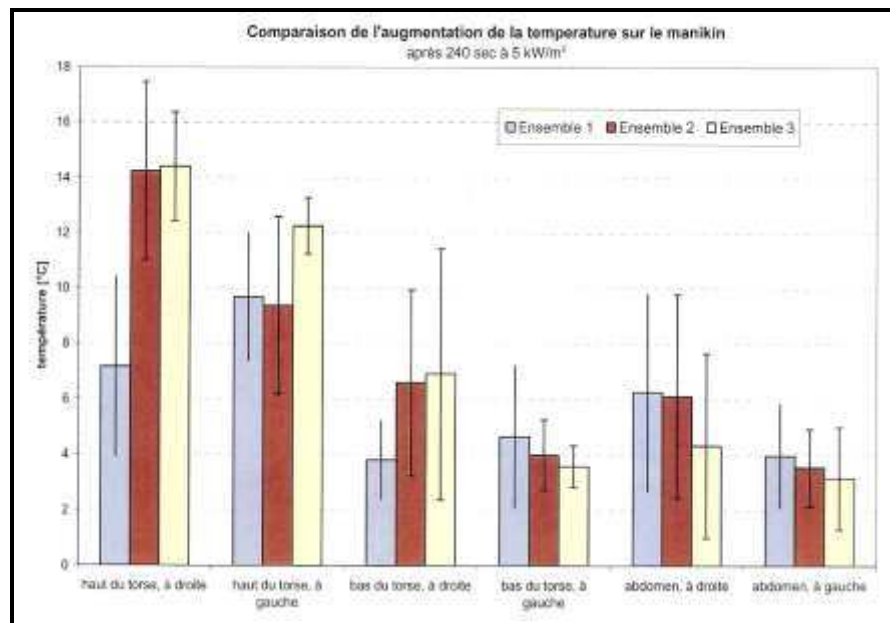


Figure 3.6 : Augmentation de température moyenne sur le torse et l'abdomen

Le rôle des couches d'air entre les vêtements est mis en évidence à partir de l'analyse simultanée des figures 3.5 et 3.6. On constate que la couche d'air située dans la zone abdominale est un excellent isolant. C'est dans cette zone que les températures en surface sur les tenues sont les plus élevées, alors que celles enregistrées sur le mannequin sont les plus basses.

Concernant le haut du torse, les températures moyennes sont beaucoup plus élevées car l'air entre les couches de vêtements est beaucoup moins important.

Par ailleurs, en raison du poids de l'appareil respiratoire isolant qui peut varier de 13,75 à 15,35 kg selon le type, et de son ajustement aux épaules et aux hanches par les bretelles et une ceinture de maintien, on peut estimer que les couches d'air entre les effets d'habillement soient écrasées, ce qui réduit les isollements entre l'environnement et le corps.

Une étude réalisée par l'institut de recherche de médecine environnementale de l'armée américaine avait abouti au constat que le risque de brûlures était lié à la faible épaisseur des couches d'air dans un système de vêtements (Kim, 2002).

Le tableau 3.2 résume les températures moyennes mesurées pour le torse et l'abdomen sur le mannequin et en surface.

Tableau 3.2 : Températures moyennes mesurées sur le mannequin et en surface

	<i>Température sur le mannequin (capteurs du mannequin) (en °C)</i>		<i>Température en surface (caméra à infrarouge) (en °C)</i>	
Modèle	Torse	Abdomen	Torse	Abdomen
Ensemble E1	37,3	32,9	143,1	153,8
Ensemble E2	42,0	33,2	161,8	173,3
Ensemble E3	40,2	26,9	163,9	173,3

Les écarts observés entre les équipements E2 et E3 sont principalement dus à la coupe du sur-pantalon ; celui de l'équipement E3 étant une salopette, une couche supplémentaire recouvre l'abdomen et le torse.

3.1.3.2. Evaluation des brûlures

Les figures 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 représentent pour les trois configurations, une estimation de la localisation de brûlures pour le torse, l'abdomen, les bras et les jambes⁶.

⁶ Les valeurs mesurées sont corrigées pour tenir compte que le mannequin ne porte pas de protections aux extrémités des membres, ni à la tête

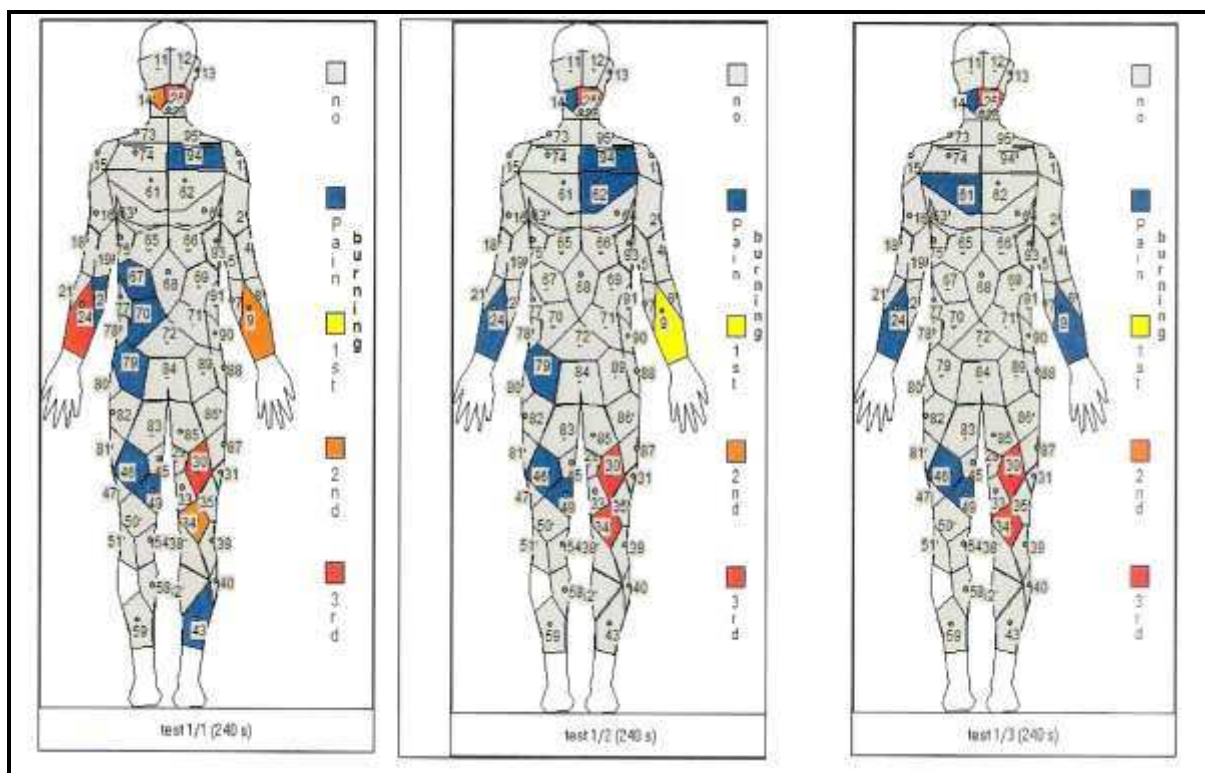


Figure 3.7 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E1

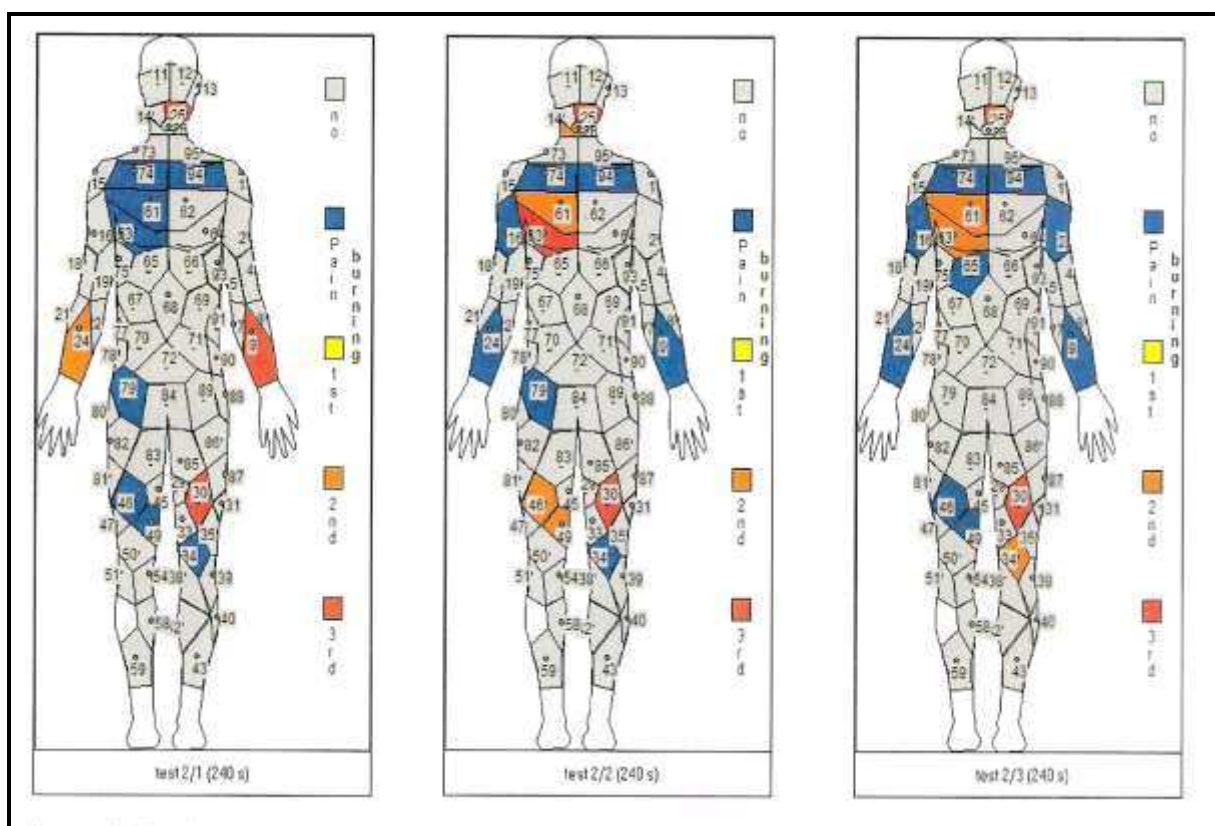


Figure 3.8 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E2

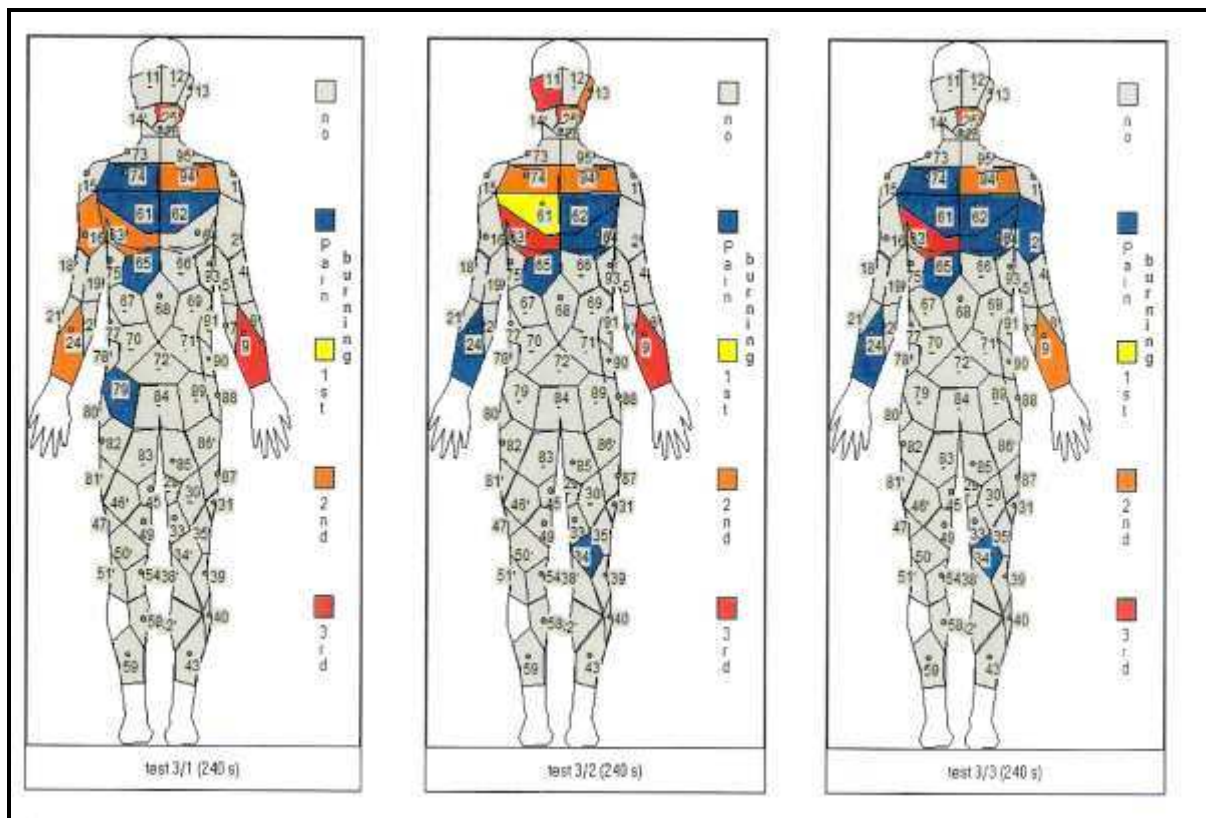
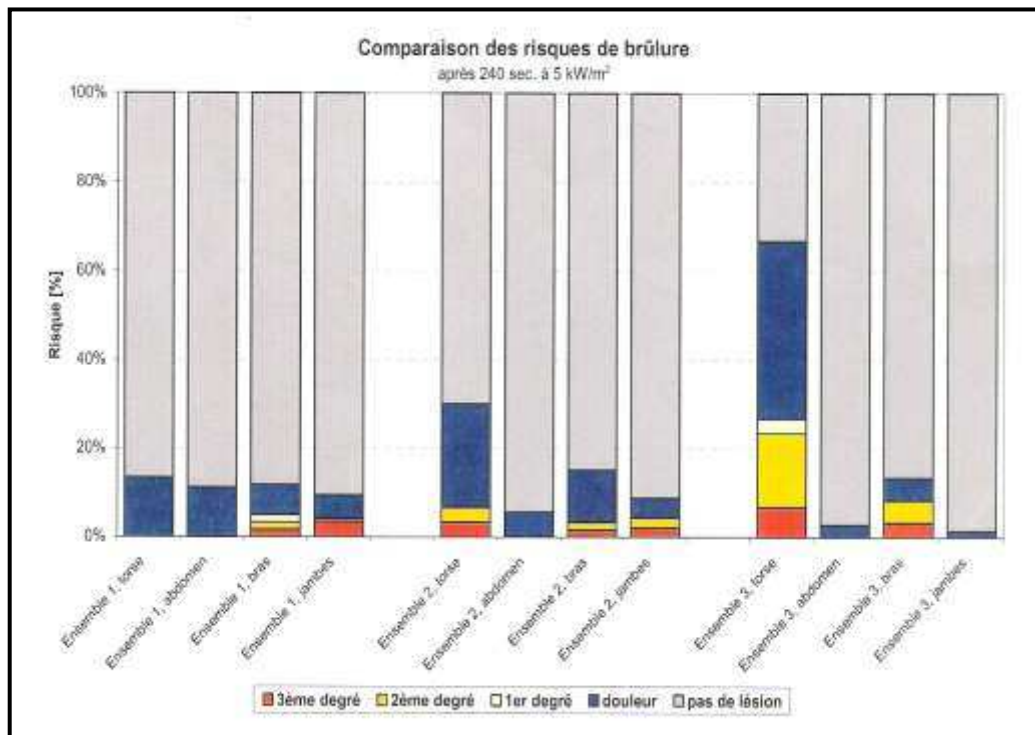


Figure 3.9 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E3

On note que pour l'ensemble E1, les zones douloureuses sont réparties à droite de l'abdomen et sur le torse et les brûlures sont localisées sur les membres inférieurs et supérieurs.

Pour l'ensemble E2, les brûlures sont essentiellement localisées sur la droite de la poitrine et les cuisses.

Et, pour l'ensemble E3, seul, le torse est irradié et les brûlures sont plus graves. Ces localisations des brûlures sur le côté droit sont favorisées par la posture du mannequin.



Ensemble E1 :

veston de peau
polo F1
pantalon F1
sur-pantalon

Ensemble E2 :

ensemble textile
polo F2 expérimental
pantalon F1

Ensemble E3 :

veste textile
polo F2 expérimental
caleçon long expérimental
sur-pantalon avec membrane imper-respirante

Figure 3.10 : Risque de brûlure à 5 kW/m²

On constate que le mannequin présente davantage de brûlures avec les ensembles textiles E2 et E3 qu'avec l'équipement E1. Ceci est lié au fait que la température de surface et la température cutanée sont plus faibles dans le cas de l'Equipement E1 et n'atteignent pas le seuil de douleur.

La température au niveau du thorax atteint et dépasse les 44°C – somme de la température cutanée habituelle du mannequin soit 32°C et de l'augmentation de température mesurée en surface (Figure 3.6) – ce qui est supérieur en certaines localisations au seuil de la douleur. En revanche, quand le mannequin est vêtu de l'ensemble E1, la température cutanée avoisine 42°C, ce qui reste sous le seuil de douleur.

La comparaison des tenues d'intervention en textile (E2 et E3) avec le veston de peau (E1), met en évidence que pour ce dernier, les températures de surface sont plutôt faibles avec peu de brûlures, ce qui permet de conclure que le transfert thermique est plus élevé avec un veston de peau.

Ce résultat s'explique par une capacité d'absorption thermique différente entre le textile et le cuir, notamment en raison de l'évaporation progressive de l'humidité naturelle de ce dernier lorsqu'il est soumis à un flux thermique faible ou modéré.

On peut en conclure, que l'absorption des calories lors de l'évaporation de l'humidité naturelle du cuir réduit les transferts de chaleur de l'environnement extérieur vers le corps et procure une meilleure sensation de confort à l'utilisateur.

3.1.3.3. Synthèse

Lors de ces tests avec une source de chaleur radiante de 5 kW/m², qui pourrait correspondre à un feu de local ou de chambre, il a été constaté d'une part, que la veste en cuir de l'ensemble E1 assurait une protection supérieure à celle offerte par la veste en textile de l'ensemble E2 ou E3 et d'autre part, que l'isolation des membres inférieurs était excellente avec le complexe sous-vêtement long et sur-pantalon de l'ensemble E3. Par ailleurs, et contrairement à l'ensemble E1 pour lequel il n'y a pas de brûlure localisée sur le torse, les ensembles E2 et E3 laissent apparaître des lésions du second et troisième degrés dans cette zone. La comparaison du nombre de zones rendues sensibles à la chaleur permet également de conclure que cette dernière est davantage ressentie par le porteur d'une veste en textile que par le porteur d'un veston de peau.

Pendant ces essais avec un flux thermique modéré, il a été constaté que la protection thermique du veston de peau était principalement liée à la vitesse d'évaporation de son humidité naturelle. La consommation de calories qui en découle et qui est négligeable pour un vêtement en textile au taux d'humidité naturelle très faible, donne ainsi de bonnes propriétés de transfert thermique au cuir.

Une dernière série de tests est réalisée avec les ensembles textiles E2Co et E3, afin d'observer le comportement des deux types de sous-vêtements mouillés (polos F1 et « F2 » expérimental) et soumis à des flux thermiques croissants qui simulent l'extension d'un feu.

3.1.4. Résultats des mesures pour un flux de 10 kW/m²

3.1.4.1. Humidification des vêtements

La méthode utilisée pour les tests de la deuxième phase est identique à celle mise en œuvre pour la première phase. Par rapport aux premiers essais, l'intensité de la chaleur a été doublée pendant les mesures pour passer de 5 à 10 kW/m², ce qui pourrait correspondre à un feu de chambre avec une extension à d'autres pièces. Pour observer les écarts entre un polo F1 en coton et un « polo F2 » expérimental lorsqu'ils sont imprégnés de sueur, les ensembles textiles E2Co et E3 testés, ont nécessité une préparation avec l'humidification des sous-vêtements.

En raison des différences de densité dans la composition des tissus de ces deux types de sous-vêtement, une quantité d'eau est appliquée sur les sous-vêtements afin de les humidifier (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Humidification des sous-vêtements

Ensemble	Sous-vêtement	Poids à sec (g)	Poids après immersion et centrifugation (g)	Surface corporelle couverte (%)	Quantité d'eau appliquée (g)
E2Co	Polo F1	300	460	37	45
	Slip			3	5
E3	« Polo F2 » ML expérimental	206,2	307,6	43,5	50
	Caleçon long expérimental	198	291,6	37	50

La quantité d'eau a été déterminée en tenant compte de la surface du corps recouverte. Puis, pour avoir une répartition uniforme de la quantité d'eau par m², les effets ont été placés dans une centrifugeuse pendant trente secondes. Ainsi, l'eau destinée à l'humidification des sous-vêtements a été appliquée par vaporisation. A la fin du test, le pourcentage d'eau évaporée ou diffusée dans les différentes couches du textile est déterminé par pesée.

Il faut noter que les essais d'exposition à 10 kW/m² ne sont réalisés que deux fois.

3.1.4.2. Températures mesurées à la surface des vêtements

La figure 3.11 présente six courbes typiques de l'évolution de la température mesurée avec la caméra à infrarouge sur la face extérieure du tronc du mannequin vêtu de la configuration E3 et soumis à un flux thermique de 10 kW/m².

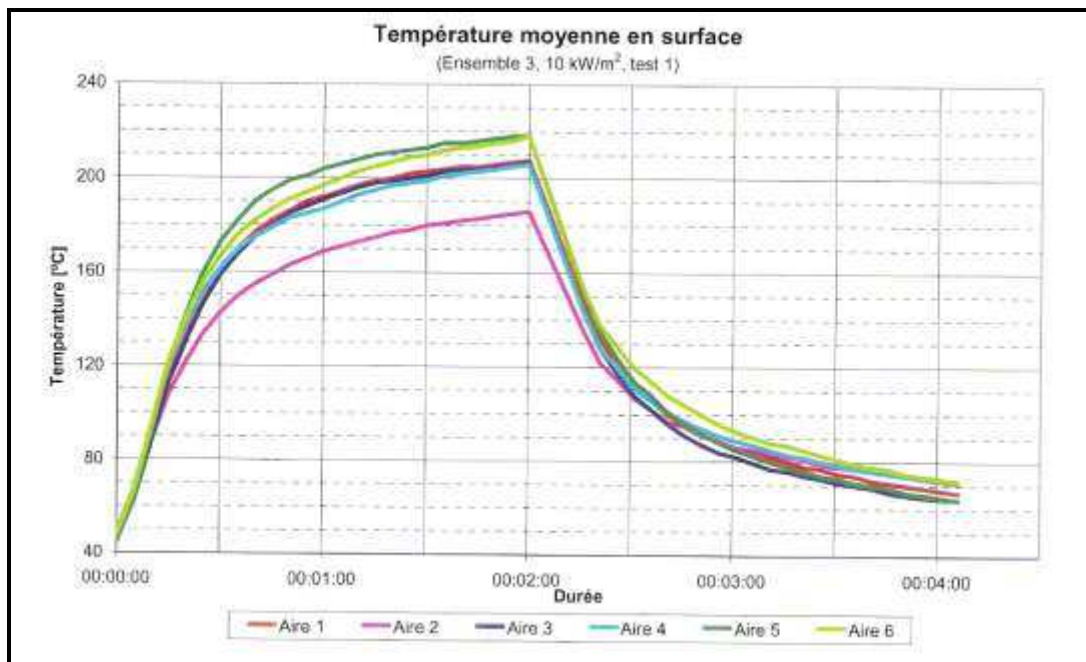


Figure 3.11 : Evolution de la température de surface pour l'ensemble E3

Chaque courbe correspond à la température moyenne de l'aire conformément à la numérotation donnée par le tableau 3.1. Après une montée significative, la température semble graduellement se rapprocher de valeurs comprises entre 190 et 230°C selon le positionnement des capteurs sur le mannequin. Après cent vingt secondes de mesures un écran est placé entre le mannequin et la source de chaleur et les températures chutent rapidement.

La figure 3.12 indique les moyennes de température atteintes à la surface extérieure de la combinaison irradiée après deux cent quarante secondes d'exposition à 5 kW/m² et cent vingt secondes à 10 kW/m².

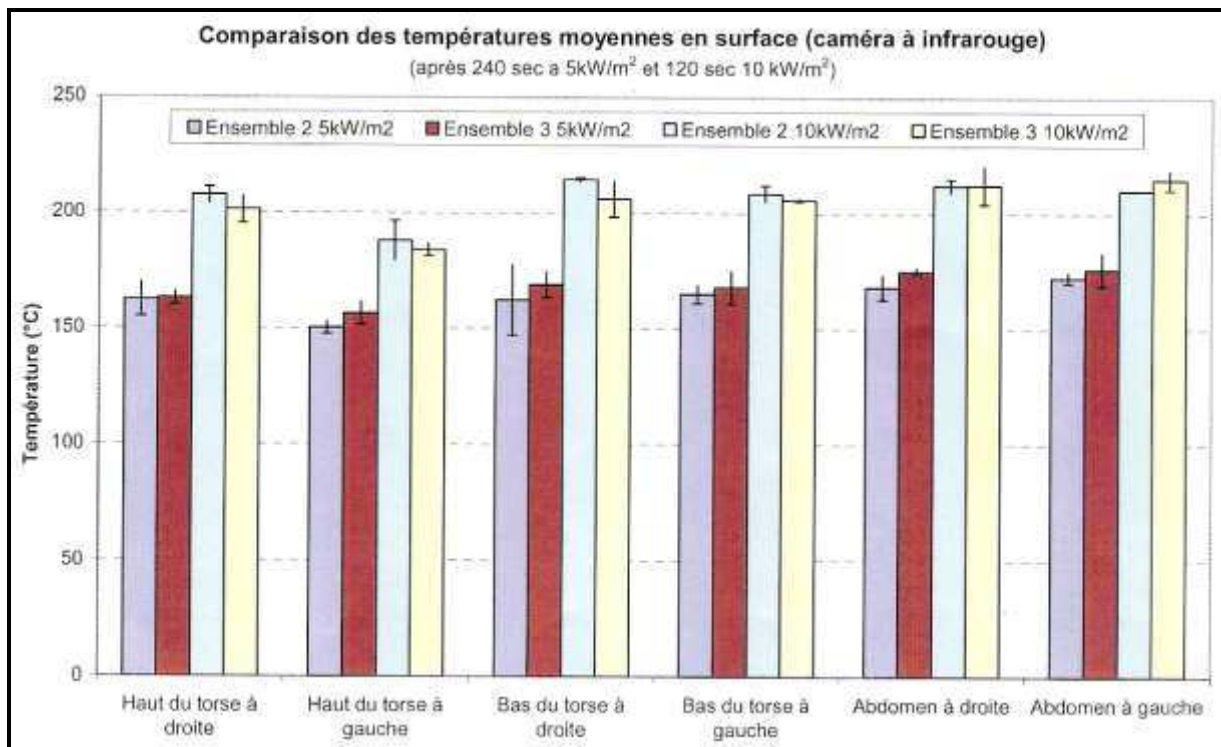


Figure 3.12 : Température moyenne en surface (Ensembles E2Co et E3)

Ces résultats montrent que les températures enregistrées à la surface sont similaires pour les deux ensembles, ce qui est normal puisqu'il s'agit du même type de veste d'intervention. Les faibles écarts observés peuvent provenir de l'ajustement de l'ensemble vestimentaire sur le mannequin.

Par ailleurs, les températures mesurées à la surface des tenues E2 et E3 sont sensiblement les mêmes, la veste d'intervention en textile étant identique pour les deux configurations.

3.1.4.3. Températures mesurées à la surface du mannequin

La figure 3.13 présente l'augmentation de température moyenne enregistrée par les capteurs.

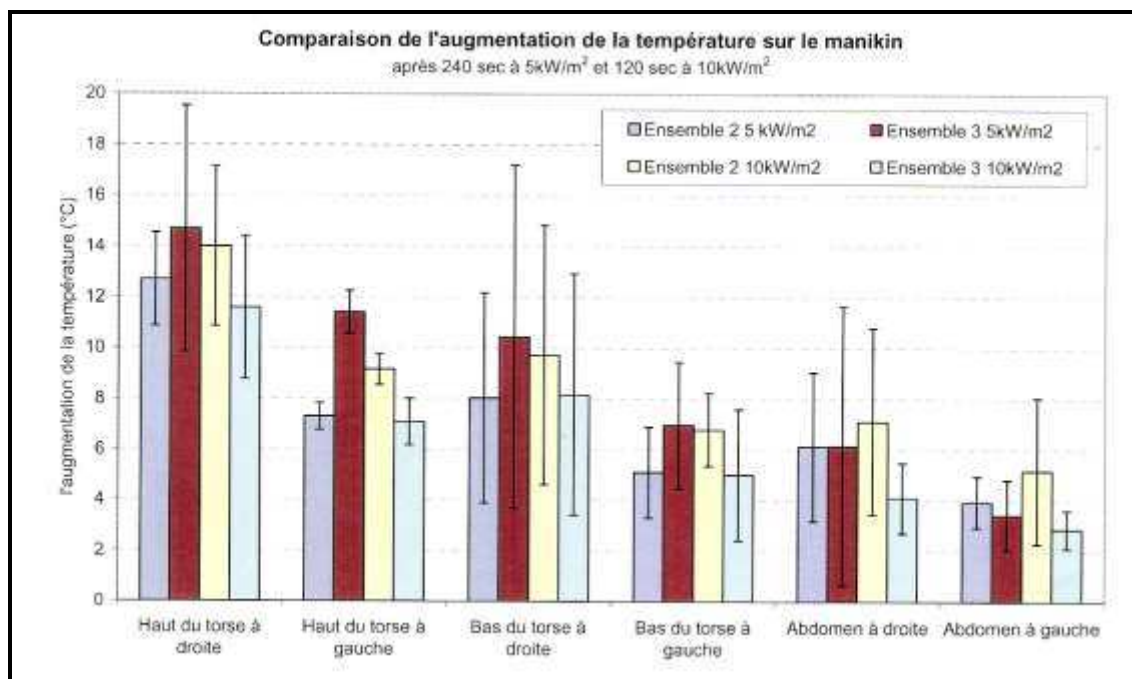


Figure 3.13 : Augmentation de température moyenne sur le torse et l'abdomen (Ensembles E2Co et E3)

Sous un flux thermique de 5 kW/m², l'élévation de température semble moins importante pour un mannequin vêtu du polo F1 que vêtu du « polo F2 » expérimental, par contre lorsque le flux thermique augmente et atteint par exemple 10 kW/m², les résultats semblent s'inverser.

Pour un flux thermique élevé, le complexe « polo F2 » expérimental et veste d'intervention en textile (E3) offrent une meilleure protection que le complexe polo F1 et veste d'intervention en textile (E2Co). Ces observations démontrent que l'eau libérée absorbe de l'énergie en raison de son importante capacité calorifique et que les différences d'humidité dans les couches d'un textile et d'un coton agissent directement sur ses capacités d'isolation thermique.

On note également par rapport aux tests de la première phase que l'humidification des sous-vêtements simulant la transpiration du mannequin et l'évaporation de l'eau réduisent l'élévation de la température sous les couches d'habits.

Le tableau 3.4 récapitule les différents flux thermiques et températures maximales mesurées sur le mannequin.

Tableau 3.4 : Températures maximales et flux thermiques moyens (mannequin, torse, abdomen)

Ensemble	E2Co	E3	E2Co	E3
Flux thermique (kW/m ²)	5	5	10	10
Flux thermique moyen (kW/m ²)	195	164	189	146
Flux thermique moyen torse (kW/m ²)	471	604	492	684
Flux thermique moyen abdomen (kW/m ²)	208	122	147	140
Température maximale (°C)	51,5	46	45,9	46,3
Température maximale torse (°C)	37,3	46	41,6	46,3
Température maximale abdomen (°C)	31,9	37,1	35,8	33,5

Les températures les plus élevées sont enregistrées sur le torse, les bras et les cuisses, confirmant ainsi que les localisations de brûlures coïncident avec les zones où les couches d'air sont les plus minces et, que les flux thermiques moyens absorbés par le mannequin sur la totalité de la surface corporelle sont inférieurs aux valeurs enregistrées pour le torse et l'abdomen.

3.1.4.3. Estimation des brûlures

Les figures 3.14 à 3.17 font apparaître l'estimation des brûlures pour les ensembles E2Co et E3 pour les deux flux d'exposition de 5 et 10 kW/m².

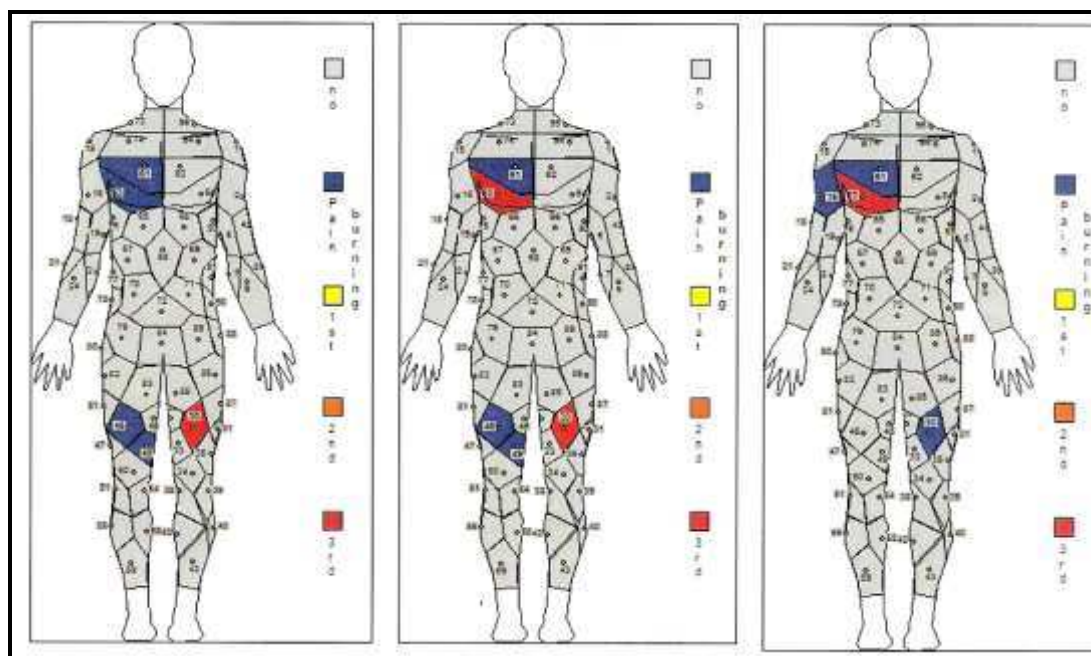


Figure 3.14 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E2Co à 5 kW/m² après 240 secondes

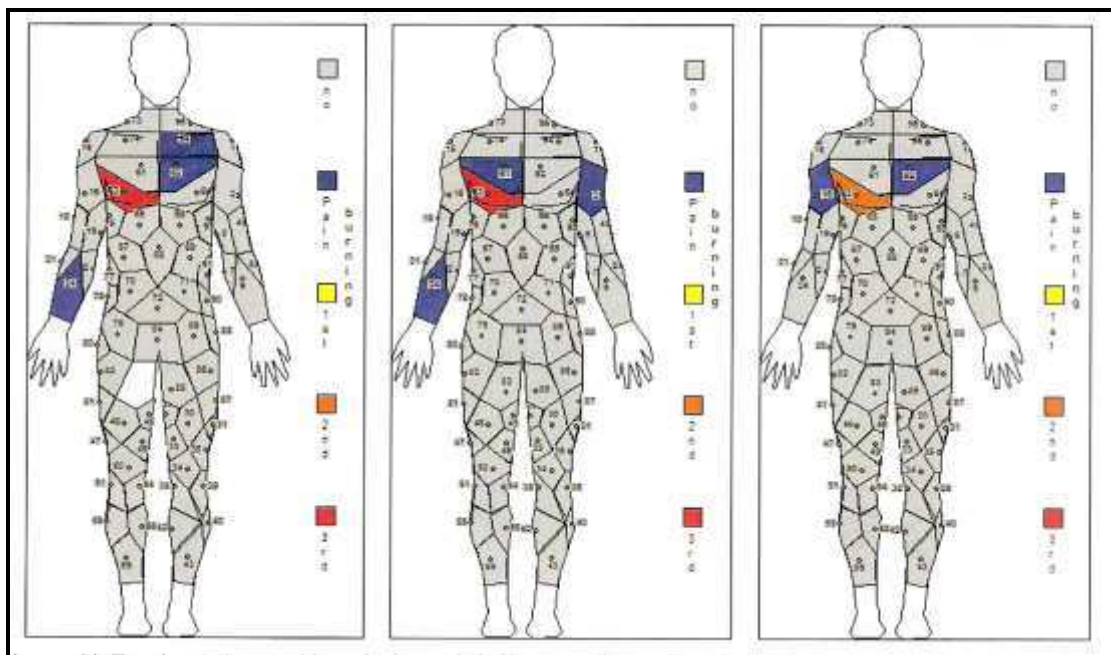


Figure 3.15: Evaluation des brûlures pour l'ensemble E3 à 5 kW/m² après 240 secondes

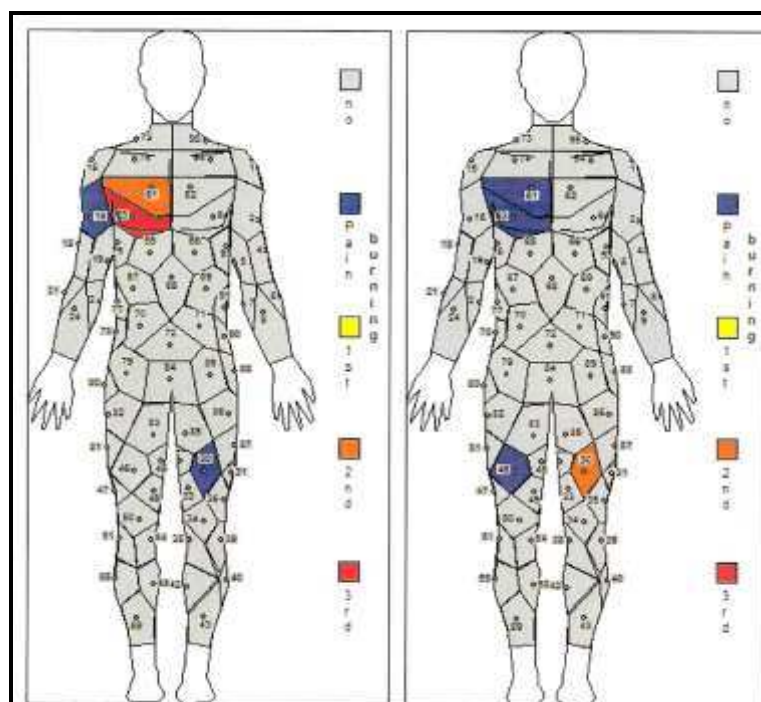


Figure 3.16 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E2Co à 10 kW/m² après 120 secondes (2 tests)

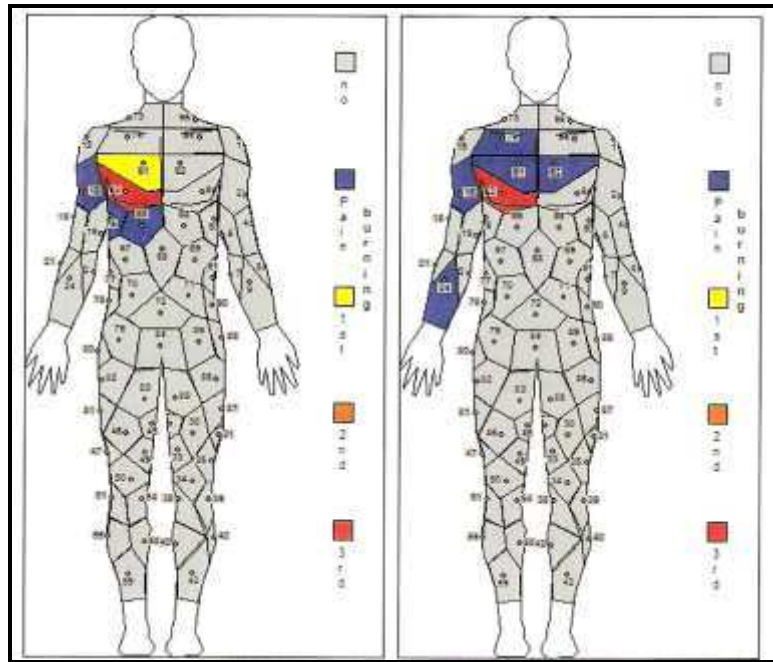


Figure 3.17 : Evaluation des brûlures pour l'ensemble E3 à 10 kW/m² après 120 secondes (2 tests)

On observe que les brûlures se situent essentiellement au niveau de la poitrine du mannequin avec quelques points de douleurs localisés sur l'avant-bras droit et sur les cuisses. L'emploi d'une veste en textile identique pour les configurations testées, donne par ailleurs une grande similitude dans les estimations des points de douleur ou de brûlures. Toutefois et selon les silhouettes, qui correspondent chacune à une mesure, la distribution des couches d'air peut être légèrement différente, ce qui explique les faibles écarts dans les résultats. Par ailleurs, et bien que le nombre de brûlures prédites soit presque identique pour les deux ensembles, l'ensemble E3 avec le caleçon long et le sur-pantalon avec membrane et en forme de salopette semble offrir une meilleure protection au niveau des membres inférieurs.

3.1.4.4. Masse perdue par les sous-vêtements durant les tests

Durant l'exposition à la chaleur, une partie de l'humidité appliquée sur les sous-vêtements s'évapore, permettant un dégagement de calories de l'équipement et de la surface du mannequin. Toutefois, étant donné que les surfaces cutanées recouvertes par les sous-vêtements sont différentes pour les deux configurations, les résultats obtenus ne sont pas très significatifs. On constate néanmoins, que l'humidité évaporée par le « polo F2 » et le caleçon long en aramide viscosse est supérieure (Figure 3.18).

Par contre, un calcul de la quantité évaporée par m² montre que les taux d'humidité évaporée sont très proches pour les deux ensembles.

Enfin si l'on se limite aux polos F1 et « F2 », on observe que le sous-vêtement en aramide viscosse (ensemble E3) permet une meilleure évaporation que le sous-vêtement en coton (ensemble E2Co).

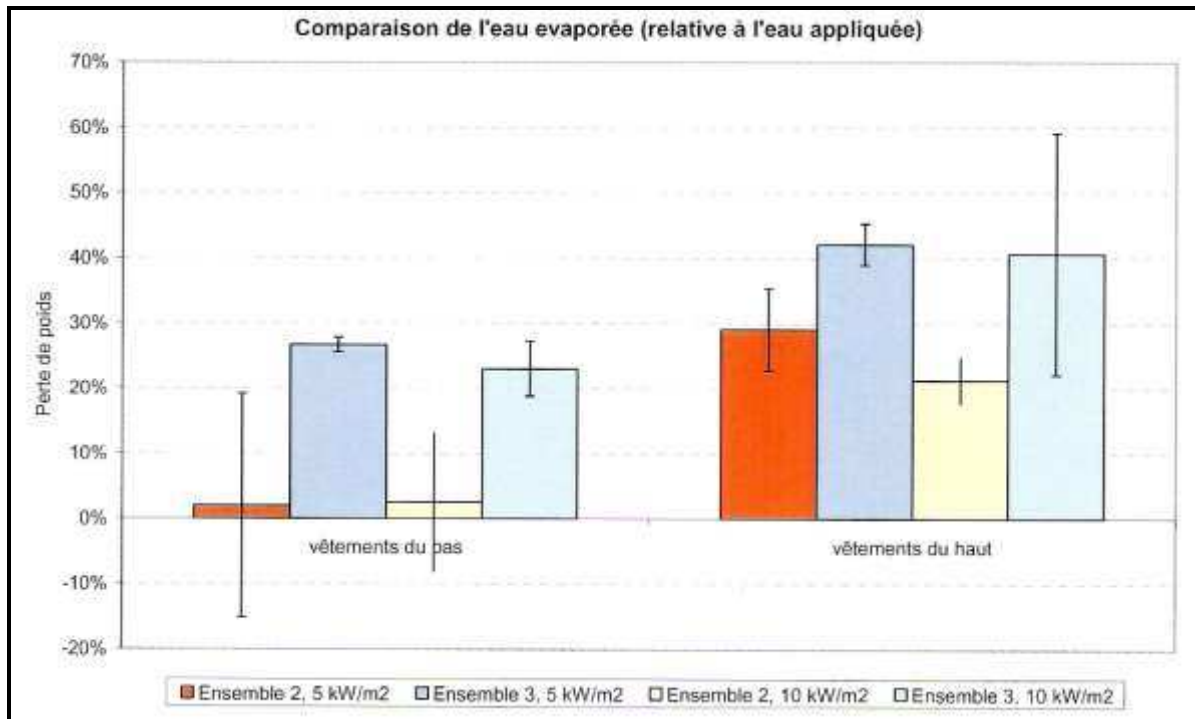


Figure 3.18: Eau évaporée dans le sous-vêtement

3.1.4.5. Synthèse relative aux essais à flux thermique modéré

Lors de ces tests à 5 et à 10 kW/m² seules des brûlures des 2^e et 3^e degrés sont localisées sur le torse et sur la cuisse pour l'ensemble E2Co. Contrairement aux tests réalisés lors de la première phase, l'effet « cheminée » avec des brûlures aux avant-bras est ici très limité ; le mannequin portait des gants en textile expérimentaux. De plus, aucune brûlure n'est visible sur les membres inférieurs du mannequin vêtu de l'ensemble E3, rendant la protection apportée par le caleçon long et le sur-pantalon avec membrane efficace. Enfin, quel que soit l'ensemble porté, il n'y a pas d'atteintes dans la zone abdominale, vraisemblablement car les couches d'air sont plus importantes et/ou de la présence du ceinturon. Comme pour les tests de la première phase, les pronostics de brûlures en partie supérieure droite du torse et sur la cuisse gauche pour le mannequin vêtu de l'équipement E2, s'expliquent par la posture du mannequin. Dans ces zones, on constate aussi que les températures mesurées avec la camera infrarouge sont plus élevées que sur les autres parties du corps.

Par contre, comme l'humidité influence la conductivité thermique et la capacité thermique du vêtement et comme l'évaporation de l'humidité consomme de l'énergie thermique, il est difficile de prédire si l'humidité peut avoir une influence positive ou négative sur la protection. Dans le cas de ces deux séries de mesures, tous ces paramètres semblent se compenser.

Enfin, il est également important de connaître le comportement des tenues lors de situations d'accident thermique car lors de certaines interventions comme par exemple, pendant le feu de chambres à Neuilly-sur-Seine, en septembre 2002, où les températures atteintes ont été estimées à plus de 1300°C (Michaelis, 2003), les sapeurs-pompiers peuvent être soumis à des flux thermiques extrêmes.

3.2. Comportement des équipements soumis à un flash thermique

3.2.1. Méthodologie d'évaluation des équipements soumis à un flash thermique

3.2.1.1. Principe de réalisation des essais avec le mannequin Thermo-man^{md}

Le mannequin instrumenté Thermo-man^{md} est un système grandeur nature d'évaluation des brûlures thermiques très perfectionné (Figure 3.19). Il s'agit d'un appareil de simulation en laboratoire servant à mesurer le rendement de divers vêtements protecteurs dans des conditions réalistes d'un embrasement généralisé éclair (Eaton et Healey, 2006).

Ces essais sont réalisés au Centre Technique Européen (ETC) de la société DuPont De Nemours à Genève (Suisse)



Figure 3.19: Thermo-man^{md} (Photo DuPont De Nemours)

Le Thermo-man^{md} est un mannequin de 1,85 m fabriqué en matériau composite réfractaire et muni de cent vingt-deux capteurs de chaleur afin d'analyser le comportement au feu des vêtements en tenant compte de facteurs comme la confection des vêtements, le poids du tissu, le type de matériau, la coupe, l'ajustement ainsi que l'incidence des vêtements de dessus et des sous-vêtements.

Grâce à ses capacités de reproduction et de contrôle des conditions d'exposition, ce système d'évaluation des brûlures thermiques peut être appliqué à une grande variété de produits. En plus de la vérification du rendement thermique des vêtements de protection employés par les industriels et les services d'incendie, le mannequin « Thermo-man^{md} » sert également à évaluer la qualité des accessoires comme les écrans faciaux, les lunettes de protection, les casques, les respirateurs, les bottes, les gants et même les tuyaux d'incendie.

Depuis sa mise au point par DuPont en collaboration avec l'armée américaine dans les années 1970, de nombreux essais ont été réalisés pour le compte de grands industriels du pétrole et de la chimie, de corps de pompiers en Europe et aux Etats-Unis et d'unités militaires tels que les pilotes de l'armée de l'air canadienne (Vardy et Waldock, 2004).

L'embrasement éclair est simulé à l'aide de douze torches très puissantes en vue d'enflammer le mannequin instrumenté. Le système Thermo-man^{md} est conçu pour supporter une plage de flux thermiques allant de 1,0 à 3,0 cal/cm²/s et pendant une durée d'exposition pouvant aller jusqu'à vingt secondes. Pendant l'essai le système de saisie de données enregistre les températures transmises par cent vingt-deux capteurs toutes les demi-secondes ce qui permet notamment de mesurer la chaleur transmise à la surface du corps à travers les vêtements testés.

Un logiciel de calcul propre au système prévoit ensuite la quantité, l'ampleur et l'emplacement des brûlures aux deuxième et troisième degrés que subirait une personne portant ces vêtements si elle était exposée à un embrasement éclair semblable.

Quatre tests sont réalisés avec des configurations de vêtements de protection différentes, afin de déterminer le niveau de protection offert par chaque effet. L'analyse porte sur les vestes d'intervention en cuir et en textile, sur le pantalon le F1 porté sans sur-pantalon, sur le pantalon F1 porté avec un sur-pantalon, sur un sur-pantalon prototype qui n'est pas en dotation à la brigade et qui est muni d'une membrane imper-respirante, sur le polo F1 MC et ML et sur l'un des sous-vêtements correspondant au référentiel du « polo F2 » expérimental ML⁷ sur les gants en cuir et les gants expérimentaux en textile.

⁷ Le polo est choisi arbitrairement parmi ceux expérimentés au chapitre 2

Lors de ces tests, le mannequin est doté d'un casque F1 et d'une paire de bottes, l'appareil respiratoire isolant n'est pas porté.

De plus, les mains et les pieds n'étant pas munis de capteurs, les résultats issus de la simulation informatique sont corrigés, ils ne tiennent pas compte des brûlures enregistrées à la tête et aux extrémités des membres (Chelingue et Jacques (c), 2005).

3.2.1.2. Protocole expérimental et tests réalisés

Chaque essai se déroule en trois temps :

- la préparation du mannequin (Figure 3.20) : pour chaque test, le mannequin est vêtu d'un sous-vêtement (ou du polo), à manches longues ou à manches courtes, de la tenue de base et d'une tenue d'intervention avec des gants ;
- l'exposition aux effets thermiques : le mannequin habillé est soumis aux flammes pendant huit secondes. Dans cet environnement, la température, mesurée par des capteurs thermiques pendant 60s, varie de 600°C à 1 000°C (Figure 3.21 à droite).
- les observations sur l'état général des équipements de protection et l'analyse de l'étendue des brûlures.



Figure 3.20 : Mannequin vêtu de sous-vêtements courts (à gauche) et longs (à droite) (Photos BSPP)



Figure 3.21: Mannequin équipé (à gauche) puis soumis au flash thermique (à droite) (Photos BSPP)

Les tests réalisés sont les suivants :

- le test n°1 a donné lieu à deux essais pendant lesquels le mannequin est équipé de la tenue E1
 - avec un polo F1 à manches courtes et sans sur-pantalon.
 - le polo F1 à manches courtes est remplacé par un polo F1 ML

- pour le test n°2, le mannequin est vêtu de l'ensemble E1 avec sur-pantalon et un polo F1 à manches courtes. Il s'agit de tester l'efficacité de protection du sur-pantalon.

- pour le test n°3, le mannequin est vêtu de la tenue d'intervention E2 avec un sous-vêtement conforme au référentiel du « polo F2 » expérimental à manches longues.

- le test n°4 est réalisé avec les dernières évolutions de l'ensemble d'intervention en textile (E3). Pour cet essai, le sur-pantalon est constitué de plusieurs couches dont une membrane imper-respirante. Sous ce vêtement, le pantalon F1 est remplacé par un caleçon long expérimental, en matière hydrophobe et « non-feu », c'est-à-dire des matériaux textiles thermostables, qui conservent une bonne tenue mécanique jusqu'à une température d'environ 400°C (Rossi, 1997). Le mannequin est également équipé de gants d'intervention en textile expérimentaux et d'un ceinturon avec longe.

3.2.2. Analyse visuelle des équipements

Les résultats sont de deux types, une analyse visuelle de l'état général des vêtements et les enregistrements des brûlures estimées (Jacques et al. (b), 2005; Chelingue et Jacques (c), 2005).

3.2.2.1. Etat général de l'équipement E1 à la suite des tests n°1 et n°2

Soumis à de très hautes températures et aux flammes pendant huit secondes, le « veston de peau » (veste de l'Equipement E1) s'altère très rapidement. Il est ainsi constaté, après la mesure de la surface de l'effet, que la rétraction d'une veste d'intervention est estimée à environ 20% (Figure 3.22). Ce rétrécissement peut même être estimé à environ 35% pour un gant d'intervention en cuir (Figure 3.23).

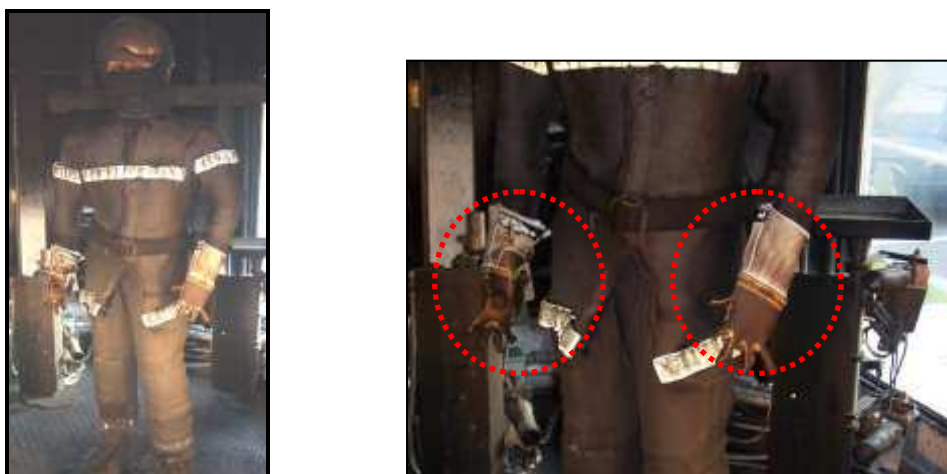


Figure 3.22 : Etat général de l'équipement E1 (Photo BSPP)



Figure 3.23 : Gant en cuir, avant et après le flash thermique (Photo BSPP)

En fait, dès que l'humidité naturelle du cuir s'est évaporée, la matière se rétracte et perd ses caractéristiques de protection mécanique (Heidet, 2002) et de perméabilité.



Figure 3.24 : Equipement E1 après le flash thermique (test n°1) (Photo BSPP)

Figure 3.25 : Equipement E1 avec sur-pantalon après le flash thermique (test n°2) (Photo BSPP)

A partir de la figure 3.24, on peut estimer que l'effet confectionné en aramide est détruit à plus de 70%. La réaction du tissu aux flammes et son exposition à la chaleur ont provoqué une modification des propriétés mécaniques du pantalon. Les membres inférieurs ne sont plus protégés, ce qui génère des risques de brûlures graves aux jambes pour le porteur.

La figure 3.25 montre que si le sur-pantalon est très détérioré (environ 25% de la surface de la couche extérieure sont détruits) le pantalon F1 porté en dessous, n'est en revanche pas détruit, seule une dépigmentation est visible par endroit.

3.2.2.2. Etat général des équipements E2 et E3 à la suite des tests n° 3 et n°4

Après une exposition de 8 secondes aux flammes dans une ambiance allant jusqu'à 1 000°C, la tenue d'intervention en textile se dégrade rapidement. Il est estimé qu'environ 50% de la couche en surface est détruite (Figure 3.26).



Figure 3.26 : Etat général après les tests n°3 (à gauche) et 4 (à droite) (Photos BSPP)

Les marquages dans le dos et les bandes formant la silhouette n'ont pas résisté au flash thermique (Figures 3.27 et 3.28). Elles sont données par leur fabricant pour résister à des températures inférieures à 300°C. D'autres éléments de la tenue comme la longe sur le ceinturon, continuent à se consumer après le passage de la boule de feu et restent propagateurs de la flamme.



Figure 3.27 : Destruction du marquage et des coutures (Photo BSPP)

Figure 3.28 : Etat de la membrane imper-respirante après le flash thermique (test n°4) (Photo BSPP)

Sous l'effet de la chaleur, le textile se rigidifie et prend un aspect « cartonneux ».

Les destructions observées sur les jambes du sur-pantalon peuvent être liées à la confection et à l'assemblage des différentes pièces constituant le vêtement (Figure 3.29) notamment en raison de la fragilité de certaines coutures et cela malgré l'utilisation d'un fil d'assemblage en aramide. Le sur-pantalon mono-couche sans membrane imper-respirante (Figure 3.30) est détruit aux jambes, à la suite de l'embrasement des bandes de marquage situées à la base inférieure du vêtement (Heidet, 2002).

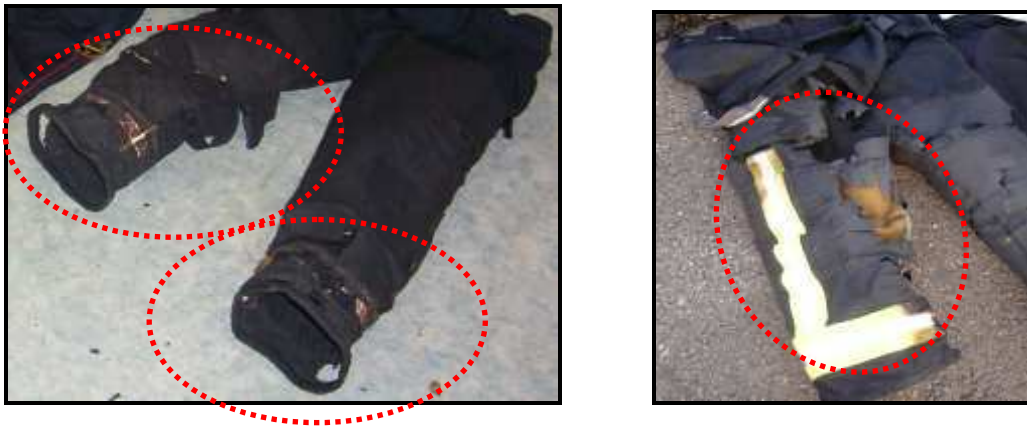


Figure 3.29 : Sur-pantalon textile mono-couche après le flash thermique (test n°3) (Photo BSPP)

Figure 3.30 : Sur-pantalon multicouches avec membrane après le test n°4 (Photo BSPP)

Le test n°4 est réalisé avec un sur-pantalon expérimental muni d'une membrane imper-respirante. Comme lors des tests précédents, on constate à l'issue de l'essai que le vêtement est superficiellement très détérioré (Figure 3.30) avec une importante surface de tissu brûlée. Toutefois, grâce à l'assemblage en multicouches et à la membrane intercalée, l'équipement offre toujours une bonne protection contre la contrainte thermique.

Le comportement au feu de la veste d'intervention en textile est identique à celui du sur-pantalon avec la membrane. L'agression thermique a détérioré la couche extérieure du tissu du vêtement et la membrane dégradée présente des traces de carbonisation en différents endroits (Figure 3.28). Toutefois, et contrairement à la veste en cuir, la tenue d'intervention en textile ne présente pas de rétrécissement visible. Le constat est identique pour les différents échantillons de gants en textile, testés (Figure 3.31).



Figure 3.31 : Gant en textile avant et après le flash thermique (Photo BSPP)

Enfin, on note que malgré la dégradation et la destruction des couches extérieures de la tenue d'intervention en textile, la tenue de base et les sous-vêtements gardent leur état initial avec leurs caractéristiques de protection.

3.2.3. Estimation des brûlures

La deuxième série de résultats porte sur la localisation des brûlures estimées sur le mannequin, leur étendue et leur degré de gravité. A partir de ces enregistrements qui confirment l'analyse visuelle effectuée précédemment, il est possible de déduire les niveaux de protection offerts par les tenues et ainsi de déterminer la configuration présentant le meilleur niveau de sécurité.

3.2.3.1. Estimation des brûlures pour les tenues E1

Les figures 3.32 et 3.33 représentent respectivement l'enregistrement des localisations de brûlures avec une estimation de leur degré pour l'équipement E1 sans sur-pantalon et avec un polo à manches courtes et manches longues.

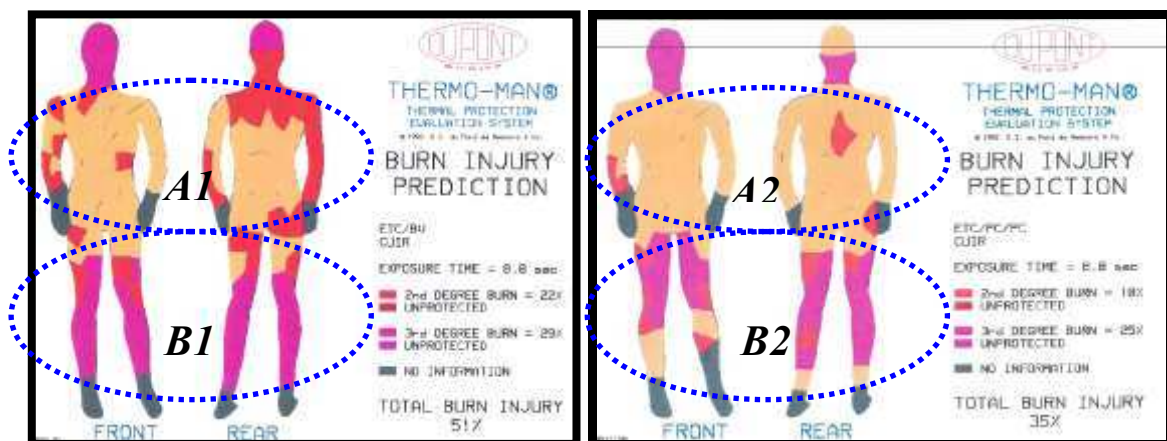


Figure 3.32 : Localisation des brûlures lors du test n°1, avec le polo F1 MC (à gauche)

Figure 3.33 : Localisation des brûlures lors du test n°1, avec le polo F1 ML (à droite)

Si ces deux figures présentent des atteintes similaires aux membres inférieurs (encadrés B1 et B2), on estime que le port d'un polo F1 à manches longues diminue la surface de brûlure d'environ 15% (encadrés A1 et A2).

La figure 3.34 qui correspond à l'enregistrement des résultats du test n°2, présente, en surface corrigée (surface du corps sans la tête, les mains et les pieds), moins de 20% de surface corporelle brûlée (Jacques, Chelingue (d), 2006).

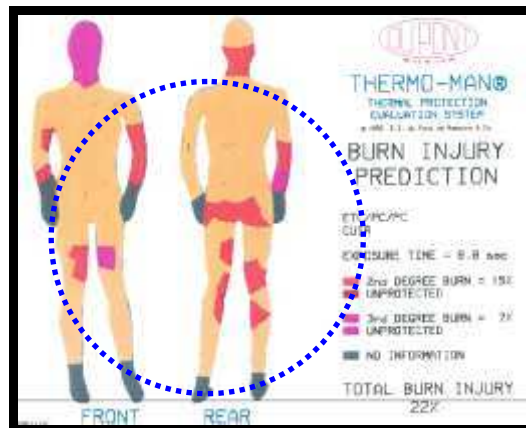


Figure 3.34: Localisation des brûlures lors du test n°2 (tenue E1 avec sur-pantalonn)

Ainsi le risque de brûlures graves pour un porte-lance non vêtu d'un sur-pantalon et d'un polo à manches longues est deux fois plus important qu'avec ces protections. On estime aussi, que sans sur-pantalon, le pompier pourrait avoir jusqu'à 70% des membres inférieurs brûlés aux deuxième et troisième degrés comme le montre la figure 3.35.



Figure 3.35: Brûlures aux membres inférieurs (Photos BSPP)

Les enregistrements sur le mannequin montrent également de nombreuses localisations de brûlures aux avant bras et aux épaules (Figure 3.36).

Ces brûlures par conduction et par flamme d'engouffrement sont d'une part, dues à l'absence de protection vestimentaire sur cette zone du membre supérieur et d'autre part, à l'important taux de rétraction du cuir après l'évaporation de son humidité naturelle. En se rétractant, le cuir perd toutes ses caractéristiques de protection, aggravant ainsi les transferts de chaleur par rayonnement et par conduction.



Figure 3.36 : Brûlures aux avant-bras et épaules (photo Lebars)

3.2.3.2. Estimation des brûlures pour les tenues E2 et E3

Les figures 3.37 et 3.38 correspondent aux résultats des localisations de brûlures et de leur degré sur le mannequin muni des équipements E2 et E3.

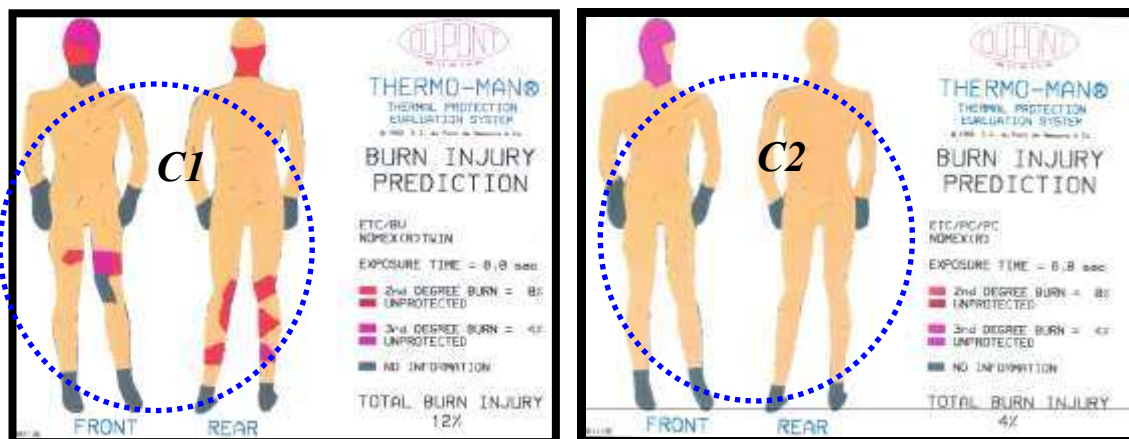


Figure 3.37 : Localisation des brûlures lors du test n°3

Figure 3.38 : Localisation des brûlures lors du test n°4

Il ressort de ces figures que malgré l'importante dégradation des vêtements, le torse et les membres supérieurs du mannequin n'ont pas été brûlés, ce qui signifie que le complexe en multicouches de la veste d'intervention assure une très bonne protection contre les flammes de contact et la chaleur rayonnante. Par contre, l'absence de membrane dans le sur-pantalon (encadré C1), se traduit par plusieurs localisations de brûlures aux membres inférieurs. L'absence de couche d'air entre le pantalon F1 et le sur-pantalon, notamment au niveau du creux poplité, constitue également l'une des causes de ces atteintes corporelles.

L'ensemble E3 semble présenter la meilleure protection, puisqu'aucune brûlure n'est localisée sur le mannequin (encadré C2).

3.2.4. Synthèse relative aux essais de flash thermique

On retiendra donc, à partir de l'analyse visuelle de l'état général des vêtements et de l'étude des enregistrements, qu'un flash, correspondant à un accident thermique en intervention, occasionnerait d'importantes dégradations sur les vêtements de protection, qu'ils soient de l'ancienne ou de la nouvelle génération. Cependant, les différentes configurations étudiées mettent en évidence que la superposition de vêtements avec une couche d'air entre chaque habit, permet de limiter les atteintes corporelles d'un tel accident. Néanmoins, en raison de la très mauvaise tenue à la chaleur radiante des effets en cuir, qui rétrécissent au contact de la flamme, le risque de brûlures pour un pompier muni de l'équipement E1 est très élevé. De ce fait, l'ensemble textile avec un sous-vêtement à manches longues et une paire de gants en textile, constitue le meilleur compromis pour le porte-lance (Jacques, 2007). Par contre, en raison de l'intensité très élevée du flux thermique lors des tests avec le Thermo-man^{md} il n'a pas été possible de mesurer des écarts entre un polo F1 en coton et un échantillon du « polo F2 » en aramide viscosse.

3.3. Synthèse

Les résultats des tests réalisés sont équivalents à ceux obtenus par les experts de différents laboratoires de protection et de physiologie européens, dans le cadre de l'élaboration de référentiels normatifs, relatifs aux caractéristiques techniques des vêtements de protection pour les sapeurs-pompiers (Holmer et al., 2006 ; Rossi et al., 2006 (a) et (b) ; Sorensen et al., 2006 ; Keiser et al., 2006 ; Ilmarinen et al., 2006, Assmann, 2006 ; Bader et al. ; 2006).

Plusieurs mesures sur des blousons ont été réalisées en chambre climatique avec des mannequins thermiques et, comme pour les essais effectués avec les équipements de la brigade, les échantillons testés étaient soit des « vestons de peau », soit des vestes d'intervention en textile multicouches avec une membrane imper-respirante. Pour ces dernières, plusieurs configurations avec des membranes différentes ont été utilisées. Pour chaque analyse, les mannequins portaient un maillot de corps en coton, comparable au « polo F1 » et, étaient soumis à des flux thermiques allant de 4 à 10 kW/m² pendant des durées équivalentes à l'apparition de brûlures.

Ainsi, pour un flux thermique de 10 kW/m², la température à la surface de la veste dépasse rapidement les 200°C et cela avant même qu'un capteur de température sur la peau n'atteigne le seuil de douleur. Sous ces rayonnements, certaines membranes se détériorent.

Les températures les plus élevées sont enregistrées aux épaules et sur le torse, selon que la veste est munie de renforts ou de poches intérieures ou encore en raison de la faiblesse de la fermeture éclair centrale lorsqu'elle n'est pas recouverte par un rabat en tissu.

Pour des flux thermiques modérés et allant jusqu'à environ 5 kW/m², le « veston de peau » offre une très bonne protection thermique. Tant que le « cuir » reste humide, la protection thermique offerte est meilleure que celle d'un effet en textile.

Par contre, lorsqu'il est soumis à une flamme de contact, un rayonnement extrême ou qu'il est desséché, le vêtement s'altère beaucoup plus vite que la veste en textile. Le « cuir » rétrécit à la suite de l'évaporation accélérée de son humidité naturelle et, la couche extérieure se durcit. Avec la perte de son élasticité et sous l'effet de la chaleur, la structure de l'habit est modifiée avec une altération des caractéristiques intrinsèques de protection. Cela est confirmé lors de la détermination du temps écoulé avant la perception de la douleur et de l'apparition de la brûlure. Le contact avec une flamme, après une évaporation très rapide de l'humidité, provoque un rétrécissement avec une modification totale de la structure et les risques de brûlures sont, de ce fait, aggravés.

Ces résultats sont en adéquation avec des recherches conduites à l'Empa en 2000 et en 2005, sur la protection des tenues de sapeurs-pompiers contre la chaleur radiante (Rossi et al., 2000 ; Rossi et al., 2005).

Lors de ces travaux il a été observé que pour le veston de peau le seuil de douleur est moyenne atteint dès deux minutes d'exposition et la brûlure au 1^{er} degré est constatée à trois minutes, ce qui donne un temps d'alerte avant brûlure, d'une minute, alors que pour certaines vestes en textile et notamment celles en service à la brigade, le premier seuil est atteint en moyenne après environ six minutes et les brûlures au 1^{er} degré apparaissent après neuf minutes. Selon l'assemblage des couches multiples, le temps d'alerte pour ces textiles est supérieur à trois minutes. On constate même pour ces vestes en textile, quelle que soit la durée d'exposition, que la brûlure au 3^e degré n'est pas atteinte.

Au terme de cette étape, on constate que même les tests avec le mannequin articulé et transpirant ne sont pas toujours suffisants. Lors de la lutte contre le feu, le porte-lance doit sans cesse, faire preuve d'initiatives qui découlent de sa condition physique du moment et des savoir-faire acquis lors de sa formation professionnelle, pour garder la maîtrise de la situation. En appliquant le « devoir du porte-lance » (BSPP, 2004), il adapte par exemple, en permanence sa position pour limiter les conséquences du flux thermique. La détermination de la durée d'engagement du porte-lance dans ces conditions particulières, ne peut se faire qu'en tenant compte des caractéristiques inter-individuelles qui n'existent pas pour un mannequin.

Chapitre 4.

Etudes préliminaires aux essais sur l'Homme en conditions réelles de lutte contre l'incendie

-
- 4.1. Simulations numériques de la charge de travail
 - 4.2. Essais en laboratoire sur tapis motorisé
-

Les essais menés par la brigade constituant une recherche biomédicale, ils sont soumis aux dispositions définies par la loi « Huriet-Sérusclat ». De ce fait, une synthèse argumentée des travaux, faisant état de l'intérêt de la recherche (Bugat, 1999), est soumise au Comité Consultatif des Personnes dans la Recherche Médicale de Paris-Cochin (CCPRM). Après l'examen du projet d'« études ergonomiques » qui détaille la méthode adoptée pour la réalisation des différentes séries d'essais, le ministère de la santé autorise, en avril 2003, les tests sur l'Homme.

Toutefois, en raison des dangers que peuvent représenter de tels tests, notamment dans un environnement réaliste de lutte contre le feu, où la température ambiante dépasse fréquemment 300°C (DDSC, 2003), une étape de simulation d'un scénario laboratoire et d'un scénario opérationnel avec la détermination de la charge de travail moyenne équivalente à la manœuvre d'extinction est réalisée (§4.1). Cette étape qui permet d'anticiper des limites de l'engagement opérationnel théorique par le contrôle de grandeurs physiologiques, s'inscrit avant tout, dans la démarche préventive adoptée tout au long de la recherche.

Puis, pour confirmer et valider les résultats obtenus par la simulation des scénarios, des essais sur l'Homme sont conduits en laboratoire à température ambiante. Ces exercices en laboratoire sont préparatoires à des tests en conditions réelles d'extinction d'un incendie sur plateaux techniques (chapitre 5).

4.1. Simulations numériques de scénarios laboratoire et opérationnel

La simulation numérique de scénarios a pour but de déterminer la durée d'engagement du sapeur-pompier à l'attaque du feu, avant qu'il ne soit confronté aux effets d'une contrainte thermique sévère. Cette durée est liée à la charge de travail relative à l'exercice à effectuer, aux conditions environnementales et aux caractéristiques intrinsèques des équipements de protection individuelle. Elle se détermine à partir de l'équation du bilan thermique.

4.1.1. Bilan thermique et contrainte thermique

4.1.1.1. Bilan thermique

De nombreux travaux relatifs au confort physiologique (Fanger, 1972 ; Vogt, 1985) et au travail à la chaleur (Martinet et Meyer, 1999), nous rappellent que l'homme est un homéotherme, c'est-à-dire qu'il assure le maintien de sa température centrale à un niveau relativement constant et proche de 37,5°C. Autour de cette valeur de référence, les systèmes de régulation utilisent des mécanismes physiologiques et comportementaux pour assurer l'équilibre du bilan thermique.

L'ergonomie des ambiances thermiques dispose d'un corpus de normes techniques internationales (AFNOR(c), 2005) qui permettent par différentes méthodes analytiques et d'interprétation d'évaluer la contrainte thermique subie par un sujet dans un environnement thermique chaud. Toutes ces méthodes mettent en œuvre les grands principes de la physiologie (Astrand et Rodahl, 1977 ; Scherrer et Monod, 1960 ; Scherrer, 1981).

Mais comme cela a été présenté par Malchaire et Lopez (Malchaire et Piette, 1995 ; Malchaire et al., 2001 ; Lopez et al., 1997), les codes de calculs classiques ne sont pas adaptés aux sapeurs-pompiers ou tout autre corps de métier travaillant avec des vêtements de protection étanches (sidérurgie, verrerie, etc.). En raison des conditions de travail particulières auxquelles les soldats du feu sont confrontés, l'application de ces normes nécessite certaines précautions car ces référentiels ne remplacent ni l'expertise ni les méthodes classiques d'analyse de l'activité. Elles restent des compléments auxquels ils convient de se référer.

Néanmoins quel que soit le logiciel de calculs utilisé, l'évaluation de la charge de travail nécessaire à l'extinction d'un feu passe par la mesure du bilan thermique et donc la comparaison des différents échanges de chaleur (gains et pertes) entre l'homme et son environnement.

Ces échanges de chaleur se font principalement par :

4.1.1.1.1. La conduction K

La conduction (K), correspond aux échanges thermiques résultant d'un contact physique entre la peau et les matériaux à l'état solide. En air, les pertes par conduction sont faibles et chez un sujet debout elles se font uniquement par la plante des pieds. Pour les sapeurs-pompiers, les surfaces de contact se révèlent supérieures à l'empreinte d'une chaussure, car le « devoir du porte-lance » appliqué lors de l'attaque du feu impose une évolution accroupie ou à genoux et souvent à l'aide des mains (BSPP-BOPE, 2004), ce qui occasionne malgré les équipements de protection de nombreuses brûlures aux mains et aux genoux. Néanmoins et malgré ces particularités, les pertes ou gains par conduction sont considérés comme négligeables ;

4.1.1.1.2. La convection C

La convection (C) correspond aux échanges de chaleur entre l'organisme et l'air ambiant. La température de la peau est le plus souvent différente de la couche d'air qui l'entoure. Il se produit par conséquent un échange thermique entre la peau et cette couche d'air. Le sens de cet échange dépend des valeurs relatives des températures de la peau et de l'air. Il peut s'agir d'une perte – on parle de pertes de chaleur lorsque l'échange thermique entre l'organisme et le milieu ambiant conduit à un refroidissement de l'organisme au profit du milieu ambiant – si la peau est plus chaude que l'air, ou d'un gain – on parle de gain de chaleur lorsque l'échange thermique entre l'organisme et le milieu ambiant conduit à un réchauffement de l'organisme au dépend du milieu ambiant – dans le cas contraire.

Ces échanges thermiques conduisent à un renouvellement naturel de la couche d'air proche de la peau. On parle de convection naturelle.

Lorsque le renouvellement est accéléré (courant d'air, vent) on parle de convection forcée.

La détermination de la convection fait intervenir :

- la température de la peau ;
- la température de l'air ;
- un coefficient d'échange par convection ;

4.1.1.1.3. Le rayonnement R

Tous les corps émettent et absorbent de l'énergie calorifique sous forme de rayonnements électromagnétiques. Un corps peu réfléchissant possédant un fort pouvoir d'absorption – ou d'émissivité – est appelé un corps noir (pouvoir d'absorption égal à 1). La peau a un pouvoir d'absorption de 0,97.

La détermination des échanges de chaleur par rayonnement fait notamment intervenir :

- la température de la peau ;
- la température radiante de l'environnement ;
- la fraction de la peau participant aux échanges (fonction de la position) ;
- l'émissivité du corps humain (0,97) ;
- un coefficient d'échange par radiation ;

4.1.1.1.4. L'évaporation E

L'évaporation (**E**), qui a lieu au niveau de l'appareil respiratoire et de la peau. Elle constitue toujours une perte de chaleur pour l'organisme. Au niveau respiratoire, l'air expiré est en général toujours plus chaud et plus humide que l'air inspiré. Au niveau de la peau, l'évaporation disperse l'eau sécrétée par les glandes sudoripares ou l'eau des couches superficielles de la peau (perspiration insensible). La détermination de l'évaporation fait intervenir :

- la pression partielle de vapeur d'eau de l'ambiance ;
- la pression saturante de vapeur d'eau pour la température cutanée moyenne ;
- un coefficient caractérisant le pourcentage de surface cutanée moyenne ;
- le coefficient d'évaporation h_e ;
- la vitesse de l'air (du vent).

En synthèse, dans l'air, les pertes par conduction sont faibles et chez un sujet debout elles se font uniquement par la plante des pieds. Elles sont donc négligées. Les échanges de chaleur par évaporation constituent toujours une perte. Les échanges de chaleur par convection ou radiation peuvent constituer des gains ou des pertes. Les réactions chimiques de l'organisme s'accompagnent d'une production de chaleur métabolique (H_m), celle-ci émane de réactions chimiques de l'organisme tant au repos qu'à l'exercice.

L'intégration de tous les échanges et de la production de chaleur métabolique permet de déterminer le bilan thermique simplifié (**B**) selon l'équation générale suivante :

$$\text{Bilan thermique} = H_m \pm R \pm C - E$$

La mesure de ce bilan thermique permet donc d'évaluer la contrainte thermique.

4.1.1.2. La contrainte thermique

La contrainte thermique apparaît lorsque le maintien de la température interne n'est plus assuré. Cette température interne qui est habituellement mesurée par la température rectale (T_{re}), est d'environ 37,5°C le matin au réveil. Cette mesure permet d'évaluer la température du noyau dont les limites supérieures admises lors d'exercices sur l'homme sont de :

- 38°C si la mesure est intermittente ou en absence de personnel médical ;
- 38,5°C ou 1,4°C d'augmentation si la mesure est continue et si la fréquence cardiaque est contrôlée ;
- 39°C si la mesure est continue et si elle s'accompagne d'une surveillance médicale avec une surveillance et une mesure de la fréquence cardiaque en continu (AFNOR/ISO 9886, 2004).

La contrainte thermique qu'elle soit chaude ou froide⁸, est la résultante de différents facteurs (ambiance climatique, activité physique, vêtement) qui tendent à modifier le niveau de température interne. Cette température centrale qui s'oppose à la température de l'enveloppe ou température cutanée moyenne (T_{sk}), varie selon les nécessités de la thermorégulation.

En deçà d'un certain seuil de tolérance physiologique, des mécanismes physiologiques régulateurs permettent le maintien de cette température interne constante en ajustant les gains et les pertes. La contrainte thermique est alors contrôlée et il y a équilibre thermique.

Lorsque la contrainte thermique est excessive, le seuil de tolérance physiologique est dépassé et l'équilibre thermique ne peut plus être assuré. Dans ces conditions:

- l'organisme exposé au chaud accumule de la chaleur et se réchauffe, on parle de stockage ;
- l'organisme exposé au froid perd de la chaleur et se refroidit, on parle alors de dette thermique ;

⁸ La contrainte au froid ne fait pas l'objet de l'étude.

Si le déséquilibre se maintient, il conduit à l'hyperthermie et à la déshydratation dans le cas d'une contrainte thermique chaude et à l'hypothermie dans le cas contraire. Ces déséquilibres sont incompatibles avec la poursuite de l'activité en cours et peuvent conduire à des accidents parfois mortels.

Il existe plusieurs seuils de tolérance physiologique selon le niveau de contrainte thermique et les risques admis ou tolérés. Le seuil de tolérance physiologique correspond à un état physiologique à partir duquel le sujet n'est plus en mesure de supporter, sans risques, les contraintes thermiques qui s'exercent sur son organisme. Généralement, cela se traduit soit par l'arrêt de l'activité en cours, soit par la recherche d'une protection vis-à-vis de l'environnement thermique ou encore par une modification de l'équipement vestimentaire.

Au chaud, les seuils varient selon que le sujet est acclimaté ou non et ils sont fonction :

- de la surface de peau recouverte par la sueur (mouillure de la peau) ;
- du débit évaporatoire maximal ;
- de l'activité physique ;
- du stockage de chaleur maximal ;
- de la déshydratation maximale.

En cas de contrainte thermique, il existe, pour chaque seuil, une durée, la Durée Limite d'Exposition (**DLE**) au terme de laquelle le seuil sera atteint.

4.1.1.3. Le rôle des vêtements et des tenues de protections

Les vêtements et les tenues de protection diminuent les échanges de chaleur sensible ($R \pm C$) selon leur résistance thermique et entravent l'évaporation sudorale selon leur indice de perméabilité à la vapeur d'eau (résistance évaporatoire). De plus, le port de vêtements et d'équipements spécifiques majore la dépense énergétique, donc la charge thermique interne.

Le bilan thermique simplifié du sujet équipé de vêtements et ou tenues de protection devient B_{cl} (Savourey et al., 2003), avec :

$$B_{cl} = H_m \pm R_{cl} \pm C_{cl} - E_{cl}$$

Ainsi, selon la valeur de B_{cl} qui prend en compte l'ambiance climatique, la dépense énergétique et les caractéristiques vestimentaires, plusieurs situations sont à envisager :

- si $B_{cl} = 0$, il y a équilibre thermique ; les pertes évaporatoires à travers le vêtement sont nulles ou équilibrent les gains de chaleur ;
- si $B_{cl} < 0$, les pertes de chaleur sont supérieures aux gains, une dette thermique s'installe, la température interne chute avec un risque d'hypothermie accidentelle ;
- si $B_{cl} > 0$, les gains de chaleur sont supérieurs aux pertes de chaleur, un stockage thermique intervient, la température interne augmente avec un risque d'hyperthermie et de déshydratation.

La production de la chaleur métabolique (H_m) est équivalente à un gain. Elle est fonction du rendement musculaire et de la dépense énergétique encore appelée le métabolisme.

4.1.1.4. Le métabolisme

Le métabolisme correspond à la dépense énergétique nécessaire au fonctionnement de l'organisme (Ganem et al., 2004).

Le métabolisme énergétique, transformation d'énergie chimique potentielle en énergie thermique et en énergie mécanique, mesure le coût énergétique de la charge musculaire et constitue un indice quantitatif de l'activité. Le métabolisme énergétique représente un facteur important pour déterminer le confort ou la contrainte résultant de l'exposition à un environnement thermique.

Lors d'opérations de lutte contre le feu, les niveaux élevés de production de chaleur métabolique, associés au travail musculaire, aggravent la contrainte thermique dans la mesure où de grandes quantités de chaleur doivent être dissipées, principalement par l'évaporation de sueur (AFNOR/ISO 8996, 2004).

Le tableau 4.1 présente les différentes méthodes de détermination de la dépense énergétique.

Tableau 4.1 : Niveaux de détermination du métabolisme énergétique (AFNOR/ISO 8996, 2004)

Niveau	Méthode	Précision	Etude du poste de travail
1 Typologies	1A : classification en fonction de la profession	Information grossière.	Pas d'étude de poste, mais information requise sur l'équipement technique et l'organisation du travail
	1B : classification en fonction de l'activité	Risque d'erreur très important	
2 Observation	2A : tableaux d'estimation par les composantes	Risque d'erreur élevé.	Etude des temps et des mouvements nécessaire
	2B : tableaux par activité spécifique	Précision : $\pm 20 \%$	
3 Analyse	Mesure de la fréquence cardiaque dans des conditions définies	Risque d'erreur modéré. Précision : $\pm 10 \%$	Etude requise pour déterminer une période représentative
4 Expertise	4A : mesure de la consommation d'oxygène	Erreur dans les limites de précision de la mesure ou de l'étude des temps. Précision : $\pm 5 \%$	Inspection du lieu de travail pas nécessaire
	4B : méthode de l'eau doublement marquée		
	4C : calorimétrie directe		

Ces méthodes relatives aux niveaux 1 ; 2 et 3 ont été appliquées pour établir une catégorisation de la charge de travail estimée de gestes régulièrement effectués par le soldat du feu sur opération. Cette catégorisation est présentée par le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Caractérisation de la charge physique au poste de travail (Warmé-Janville (b), 2003 ; AFNOR/ISO 8996, 2004)

Classe	Valeur pour le calcul du métabolisme moyen		Exemples ⁹
	W	W/m ²	
	70	55	Repos assis
	100	65	Repos debout
Léger	180	100	Travail de secrétariat, travail manuel léger assis (taper sur un clavier, écrire, etc.) ; Travail assis avec de petits outils, inspection, assemblage ou triage de matériaux légers ; Travail des bras et des jambes (conduite de véhicule dans des conditions normales, manœuvres légères, etc. ; Travail debout (forage, polissage, etc.) ; Utilisation de petites machines à main ; Marche occasionnelle lente (inférieure à 3, 5 km/h).
Moyen	300	165	Travail soutenu des mains et des bras (cloutage, vissage, limage) ; Travail de bras et des jambes (manœuvre sur chantier d'engins) ; Travail de bras et du tronc , travail au marteau pneumatique, cueillette de fruits et de légumes ; Manutention manuelle occasionnelle d'objets moyennement lourds ; Marche entre 3,5 et 5,5 km/h, ou marche avec une charge de 10 kg.
Lourd	410	230	Travail intense des bras et du tronc ; Manutention manuelle d'objets lourds (poubelle de 50 kg lors du déblai) , de matériaux de construction ; Travail au marteau, à la hache ; Opérations de déblai avec pelle, avec scie, etc. Marche rapide (de 5,5 à 7 km/h) ou marche avec une charge supérieure à 15 kg Pousser ou tirer un dévidoir , une brouette chargée ; Pose de blocs de béton.
Très lourd	520	290	Travail très intense et rapide (déchargement d'objets lourds) ; Travail au marteau ou à la hache (4,4 kg, 15 coups/minute) ; Pelletage lourd, creusage de tranchée ; Montée d'escaliers ou d'échelles ; Marche rapide, course supérieure à 7 km/h ;

⁹ En gras, les gestes habituellement réalisés par les sapeurs-pompiers lors des manœuvres et les interventions

4.1.1.5. Seuils de danger et durées limites d'exposition (DLE)

La perte hydrique et le stockage de chaleur constituent pour l'organisme les principales astreintes sudorales et thermiques. Des valeurs limites sont fixées pour ces deux critères d'astreinte physiologique (NF ISO 7933, 2005), lorsque l'une ou l'autre de ces limites est atteinte, l'exposition à la chaleur doit cesser. D'autres critères de l'astreinte sudorale sont également pris en compte pour le calcul du bilan thermique et l'établissement de la durée limite d'exposition au travail à la chaleur.

Le référentiel normatif s'applique pour un sujet en bonne santé et apte à son travail. Ces sujets entraînés et acclimatés au travail sous des températures élevées ont une tolérance accrue à la chaleur et de ce fait, ils peuvent produire une plus grande quantité de sueur, allant jusqu'à mouiller l'intégralité de leur surface cutanée.

4.1.1.5.1. La mouillure cutanée maximale (w_{max}).

Pour une ambiance donnée, les pertes de chaleur par évaporation dépendent de la surface de peau mouillée.

Le débit sudoral augmente jusqu'à l'obtention de la surface mouillée nécessaire à l'équilibre du bilan thermique, compte tenu des possibilités d'évaporation déterminées par le milieu ambiant. Cette évaporation de la sueur et la surface de peau mouillée sera d'autant plus difficile à atteindre que l'humidité de l'air sera élevée. Inversement, dans un air très sec, la sueur s'évapore très vite et une faible surface mouillée peut suffire pour équilibrer le bilan thermique.

La mouillure cutanée (w) est la surface de peau mouillée, exprimée en % de la surface totale (en moyenne : 1,80 m² chez l'homme). Une mouillure cutanée de 50 % signifie que la moitié de la surface totale de la peau est mouillée. La mouillure cutanée maximale (w_{max}) est le pourcentage maximal que le sujet peut obtenir.

La mouillure cutanée maximale dépend de l'acclimatement à la chaleur. L'acclimatement entraîne une redistribution des glandes sudoripares, notamment du tronc vers les membres, et la fraction de peau mouillée pour atteindre 100 %. La valeur de w_{max} est fixée par la norme à 85% chez les sujets non acclimatés et à 100% chez les sujets acclimatés.

4.1.1.5.2. La sudation maximale (sw_{max}) :

Le débit sudoral est la quantité de sueur produite par heure par le sujet. Le débit sudoral maximal est la limite fixée arbitrairement par la norme : on considère que le sujet ne peut pas produire plus d'une certaine quantité de sueur par heure. Cette limite est appelée la sudation maximale requise sw_{max} .

Le débit sudoral maximal est exprimé en Watt par mètre carré. Une quantité de sueur peut être exprimée par la quantité de chaleur qui serait consommée lors de son évaporation. Cette quantité de chaleur correspond à une quantité d'énergie et se mesure en Joules. L'évaporation d'un litre de sueur consomme 2 492 kJ.

Si la sueur s'évapore complètement au fur et à mesure de sa production, la quantité de sueur produite par unité de temps, c'est-à-dire le débit sudoral en gramme par heure, peut être exprimé par un flux de chaleur. Ce flux de chaleur représente la quantité de chaleur qui serait consommée, par unité de temps, lors de l'évaporation. Il correspond à une puissance et se mesure en Watt.

Un débit sudoral de 1 000 grammes par heure correspond à un flux de chaleur de 692 Watt ($1 \text{ kg} \times 2\,492\,000 \text{ J.kg}^{-1} / 3\,600 \text{ sec.} = 692 \text{ W}$).

Au niveau de l'organisme, la production de sueur et les possibilités de refroidissement dépendent directement du débit sudoral et de l'évaporation par unité de surface cutanée. L'évaporation par unité de surface correspond à une densité de flux de chaleur et se mesure en Watt par mètre carré.

Un flux de chaleur de 692 Watt pour une surface cutanée de 1,8 m² correspond à une densité de flux de chaleur au niveau de la peau de 384 Watt par m² ($692 \text{ W} / 1,8 \text{ m}^2 = 384 \text{ W/m}^2$). Il faut noter que l'on considère que la surface cutanée est dans tous les cas de 1,8 m² (même si le sujet n'est pas acclimaté et sa mouillure limitée à 85 %).

Pour les valeurs limites de la sudation (et la perte hydrique) la norme propose de prendre en compte, outre l'acclimatement, deux niveaux pour les valeurs limites en raison des grandes différences inter-individuelles :

- un niveau d'alarme pour lequel un sujet physiquement apte et en bonne santé ne court pas de risque ;
- un niveau de danger pour lequel certains sujets, bien que physiquement aptes et en bonne état de santé, peuvent courir un certain risque.

La sudation maximale dépend donc de l'acclimatement et du seuil retenu. Les ordres de grandeur sont les suivants (Landry et Ojalvo, 1999 révisé) :

- sujet non acclimaté : alarme : 0,5 l/h
- sujet non acclimaté, danger : 0,65 l/h
- sujet acclimaté, alarme : 0,8 l/h
- sujet acclimaté, danger : 1 l/h.

4.1.1.5.3. La perte hydrique maximale (D_{max})

La perte hydrique est la quantité totale de sueur produite lors du travail à la chaleur. La perte hydrique maximale recommandée au cours d'une journée de travail est fixée arbitrairement par la norme. L'atteinte de cette limite avant la fin de la journée doit entraîner l'interruption de l'exposition à la chaleur. La perte hydrique est une quantité d'eau qui peut être exprimée par la quantité de chaleur qui serait consommée lors de son évaporation et par un flux de chaleur en considérant que la surface cutanée est de 1.8m^2 .

La perte hydrique maximale dépend de l'acclimatement et du seuil (alarme ou danger) retenu.

Les ordres de grandeur sont les suivants:

- sujet non acclimaté : alarme : 2,5 l/h
- sujet non acclimaté, danger : 3 l/h
- sujet acclimaté, alarme : 4 l/h
- sujet acclimaté, danger : 5 l/h.

A titre d'exemple, le système de refroidissement par la sudation chez l'homme peut être représenté par la figure suivante (Figure 4.1):

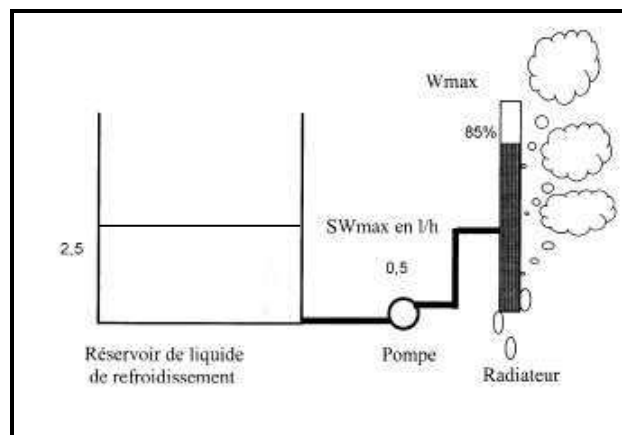


Figure 4.1 : Seuil d'alarme pour un sujet non acclimaté (Cholat, 2006)

L'organisme dispose d'une quantité limitée de « liquide de refroidissement ». Lorsque la perte hydrique maximale est atteinte, le réservoir est vide et l'exposition à la chaleur doit cesser. Bien évidemment ce réservoir est fictif, cela signifie que l'organisme est déshydraté et que la poursuite de l'exposition à la chaleur peut avoir des conséquences sur la santé.

Un point important à souligner est que la norme considère que l'eau intégrée n'a pas le temps de devenir disponible au niveau de la peau pour assurer le refroidissement : lorsque la perte hydrique maximale est atteinte il ne faut pas tolérer d'autres expositions à la chaleur dans la même journée.

La pompe schématise la sécrétion des glandes sudoripares. Le débit maximal de la pompe représente la sudation maximale. La valeur dépend de l'acclimatement et du seuil (alarme ou danger) retenue.

La circulation d'eau sur une plus ou moins grande surface au niveau du radiateur schématise la distribution des glandes sudoripares sur la peau. Chez le sujet non acclimaté, la fraction de peau mouillée ne dépasse pas 85 %.

Il faut noter qu'une partie de la sueur produite ne s'évapore pas sur la peau. Cette fraction de sueur produite mais inutilisée pour le refroidissement est d'autant plus importante que le débit de sueur augmente.

4.1.1.5.4. Le stockage maximal de chaleur (Q_{max})

Lorsque le bilan thermique n'est plus équilibré l'organisme accumule de la chaleur et sa température centrale s'élève. La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un corps de 1°C dépend de la masse et de la nature de ce corps. La chaleur massique des tissus est de l'ordre de $3,45 \text{ KJ/kg/}^{\circ}\text{C}$. Cela signifie qu'il faut $3,45 \text{ kJ}$, soit $0,96 \text{ Wh}$, pour élever de 1°C une masse de 1 kg de tissu humain.

La norme (NF EN 12 515) fixe des valeurs maximales pour l'élévation de la température centrale. Ces valeurs ne sont pas modifiées par l'acclimatement, elles sont les mêmes chez les sujets acclimatés ou non. Par contre deux niveaux sont donnés en fonction du seuil (alarme ou danger) retenu.

Les valeurs maximales sont de $0,8^{\circ}\text{C}$ pour le seuil alarme et de 1°C pour le seuil danger.

Ceci correspond à une quantité maximale de chaleur de :

- 54 Wh pour le seuil « alarme » ($0,96 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 0,8 ^\circ\text{C} \times 70 \text{ kg} = 54 \text{ Wh}$) ;
- et environ 67 Wh pour le seuil « danger » ($0,96 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 1 ^\circ\text{C} \times 70 \text{ kg} = 67 \text{ Wh}$).

Le flux de chaleur résultant du calcul du bilan thermique correspond à une puissance mesurée en Watts. Le produit de ce flux de chaleur **F** par la durée d'exposition **D** en heures correspond à la quantité de chaleur **Q** accumulée par l'organisme en Watt.heure.

$$F (W) \times D (h) = Q (W.h)$$

La durée limite d'exposition **DLE** en heure est obtenue en divisant le stockage maximal de chaleur **Qmax** par le flux de chaleur résultant **F**

$$DLE = Q_{max} / F$$

Où : Qmax est en W.h/m²

F en W/m²

Finalement, **Qmax** = 55 W.h/m² (seuil alarme) et 67 W.h/m² (seuil danger).

4.1.1.3.5. Durée limite d'exposition (DLE)

En application des éléments précédemment cités, on distingue au chaud :

- des **DLE** liées aux seuils de stockage (le stockage thermique se produit lorsque l'organisme exposé au chaud accumule de la chaleur et se réchauffe. Si le déséquilibre se maintient, il conduit à l'hyperthermie et à la déshydratation) :
 - Alarme « stockage » : premier seuil de stockage de chaleur. Ce seuil ne représente aucun risque pour un sujet en bonne santé. Il correspond à une augmentation de :
 - 0,8°C de la température interne ;
 - 3.5°C de la température cutanée moyenne.
 - Alarme « Danger stockage » : deuxième seuil de stockage de chaleur. Ce seuil représente un certain risque pour un sujet en bonne santé. Il correspond à une augmentation de :
 - 1°C de la température interne ;
 - 4°C de la température cutanée moyenne.

- Alarme « Extrême danger stockage » : troisième seuil de stockage de chaleur. Ce seuil représente un risque potentiel important pour un sujet en bonne santé. Il correspond à une augmentation de :

- 1,5°C de la température interne ;
- 4°C de la température cutanée moyenne.

Le franchissement de ce seuil expose le sujet à un accident grave comme par exemple un coup de chaleur (AFNOR/ISO 7933, 2005 ; AFNOR/ISO 9886, 2004).

- Alarme « STANAG stockage » (norme OTAN) : quatrième et dernier seuil de stockage de chaleur. Ce seuil représente un risque potentiel important pour un sujet en bonne santé. Il correspond à :

- 39°C de température interne ;
- 4°C d'augmentation de température cutanée moyenne.

L'atteinte de cette limite impose l'arrêt immédiat de l'activité en cours (STANAG 2895, AFNOR/ISO 9886, 2004).

- des **DLE** liées aux seuils de déshydratation (perte d'eau liée – dans le cas d'une contrainte thermique chaude – à l'évaporation sudorale) :

- Alarme déshydratation : premier seuil de déshydratation :

- pour un sujet non acclimaté, il correspond à une perte en eau de 2600 g ;
- pour un sujet acclimaté, il correspond à une perte en eau de 3900 g.

Le calcul de ce seuil prend en compte une compensation de 75% des pertes hydriques (ISO 7933, 2005 ; ISO 9886, 2004).

4.1.2. Simulation numérique de la contrainte thermique pour un scénario « laboratoire » et un scénario opérationnel

4.1.2.1. Modèles d'évaluation de la contrainte thermique

En ambiance chaude et en application de l'équation du bilan thermique, l'évaporation de la sueur sur la peau est le seul moyen d'évacuer la chaleur, le logiciel permet d'estimer le débit de sueur qu'un sujet travaillant en ambiance chaude doit produire pour équilibrer son bilan thermique. Ce débit de sueur est appelé « la sudation requise ».

La modélisation permet ainsi, d'identifier les situations où l'équilibre du bilan thermique n'est pas assuré et, de calculer dans ce cas, le stockage de chaleur par l'organisme avec l'élévation de sa température centrale.

L'évaluation de la contrainte thermique se base souvent sur la valeur de la sudation requise comme cela est proposé dans la norme ISO 7933 (AFNOR, 2005) et permet d'estimer le flux de chaleur par évaporation, la mouillure cutanée et le débit sudoral requis afin que le sujet reste en équilibre thermique.

Toutefois, et comme le précise la norme, cette méthode d'évaluation, dans sa forme actuelle, ne peut pas être utilisée dans le cas du port de vêtements spéciaux de protection (vêtement réfléchissant, réfrigéré et ventilé, imperméable, avec équipement individuel de protection).

Des améliorations à ce modèle ont été proposées pour tenir compte soit :

- d'ambiances thermiques modérées en environnement stable, c'est le cas du logiciel de simulation Protect® utilisé par le Centre d'Etudes du Bouchet (Warmé-Janville (b), 2003). Il est basé sur un modèle mathématique de la thermorégulation humaine mis au point par Stolwijk (1970). Ce logiciel permet d'estimer les échanges hygrothermiques d'un individu et d'obtenir une prédiction des températures internes et cutanées, de la fréquence cardiaque ainsi que de la sudation, afin de pouvoir évaluer les risques encourus par un sujet travaillant dans une ambiance thermique modérée.

L'utilisation de Protect® a donc été limitée à la seule simulation du scénario « laboratoire » (cf §4.1.3).

- d'ambiances thermiques élevées. Prédicool est un outil de calcul du Centre de Recherches du Service de Santé des Armées (CRSSA) pour la prévention des risques thermophysiques (Savourey et Bernard, 2004 ; Savourey et al., 2007) . Il a été validé lors de plusieurs études sur la capacité opérationnelle des militaires français au cours de missions opérationnelles en milieu tropical (Besnard et al., 2001 ; Savourey, 2003).

Il permet de prédire des temps de tolérance physiologique dans des ambiances thermiques élevées en intégrant les conditions de travail du pompier. L'activité physique réalisée dans des ambiances sévères et le port de l'équipement vestimentaire entravant les échanges thermiques, sont pris en compte.

Prédicool a été utilisé pour simuler plusieurs variantes du scénario opérationnel (cf §4.1.3).

Un scénario « laboratoire » et un scénario « opérationnel » ont été arrêtés après une analyse préliminaire au cours de laquelle plusieurs mises en scène de manœuvres réalisées avec des personnels régulièrement affectés au « premier secours » ont été filmées (Warmé-Janville, Jacques 2003).

Les simulations numériques doivent permettre de conclure quant à la réalisation de ces scénarios par l'Homme en laboratoire sur tapis motorisé et en conditions réelles sur un plateau technique de type maison à feu.

4.1.2.2. Le scénario « laboratoire »

Le scénario « laboratoire » est organisé en cinq phases. Il s'agit d'une succession d'exercices réalisés sur un tapis. Ce scénario s'inspire de celui mis au point par la Délégation Générale pour l'Armement dans le cadre du programme « FELIN » (DGA, 2000 ; Naves, 2001). Il est également régulièrement testé lors d'études sur la définition de la capacité opérationnelle des militaires français équipés d'équipements de protection contre les risques nucléaire, radiologique, biologique et chimique (NRBC) en ambiance chaude (Melin et Warmé-Janville, 1998 ; Warmé-Janville et al. 1999 ; Warmé-Janville (b), 2002).

Le scénario comporte :

- une phase d'attente où le sujet est en position assise ;
- une phase d'activité constituée par une marche à 4 km/h ;
- une phase de repos en position debout, pendant laquelle il y a un changement de bouteille d'ARI ;
- une seconde phase d'activité identique à la première ;
- une phase de récupération en position assise pour clôturer l'exercice.

4.1.2.3. Le scénario « opérationnel »

Le scénario « opérationnel » correspond à la succession des gestes élémentaires (Warmé-Janville, Jacques 2003) qui constituent la manœuvre générique réalisée par l'équipage du « premier secours » lors de l'attaque d'un feu. Les gestes à réaliser sont décrits dans le règlement opérationnel de la brigade (BSPP-BOPE, 2004). Pour le thème retenu, l'incendie concerne deux niveaux avec une propagation du feu du premier au second étage par un escalier intérieur.

Lors de l'analyse préliminaire plusieurs scènes ont été tournées afin que les paramètres tels que la température ambiante, l'horaire de la manœuvre (jour ou nuit) ainsi que l'activité en cours à l'instant de l'alerte, soient pris en compte.

Il a ainsi été constaté que selon les hypothèses de départ du scénario, les comportements physiologiques du sujet variaient différemment pendant l'exercice. Par exemple, la fatigue générée par la manœuvre d'extinction est ressentie bien avant par le porte-lance selon que l'intervention se déroule dans la continuité directe d'un entraînement foncier, ou d'une séance d'instruction en salle. Pour un même exercice, la sollicitation sera également différente selon que la température ambiante est inférieure ou supérieure à environ 20°C (Martinet et Meyer, 1999), ou qu'il pleuve. De plus, une opération de nuit, lorsque le pompier est réveillé par une alarme sonore asservie à la lumière, occasionne généralement plus de stress que pour le même type d'intervention de jour.

Pour faciliter l'interprétation des résultats enregistrés, les gestes constituant la manœuvre forment trois séquences actives (A, B et C). Une température ambiante de 25°C, avec une humidité relative de l'air 45 % et une vitesse du vent 0,5 m/s sont les critères environnementaux retenus. Par ailleurs, l'infrastructure décrite ci-après, correspond aux installations techniques de la maison du feu qui seront utilisées pour les essais en situation de feu réel.

La séquence A se compose des phases suivantes :

- situation de départ avant l'alerte : Il n'y a pas d'activité physique avant l'alerte, le sujet en tenue de travail (tenue de base) avec ses bottes, son pantalon et son « polo F1 », vient de prendre un repas ;
- réactions lors de l'alerte : Le sujet effectue un déplacement en marche rapide sur une centaine de mètres pour rejoindre l'engin. Il monte dans le « premier secours » enfile la veste d'intervention et le casque ;
- action lors du déplacement en véhicule : Pendant le trajet reliant le centre de secours et l'adresse de l'intervention, le sujet est assis. La durée de ce déplacement qui, est estimée à environ six minutes (BSPP/BOPE (b), 2005), correspond au temps moyen nécessaire à un engin pour se rendre depuis sa caserne d'affectation au point le plus éloigné de son secteur de compétence.

La durée totale de la séquence A est d'environ cinq cent quarante secondes (BSPP/BOPE (b), 2005).

La séquence B correspond aux actions réalisées par le pompier dès son arrivée à l'adresse de l'incendie. Le sujet, après être descendu de l'engin entièrement équipé des protections individuelles, se rend à l'arrière du véhicule, décroche un dévidoir mobile d'un poids de 50 kg, puis saisit une commande en sac d'un poids d'1,5 kg, deux tuyaux et une lance à incendie. Ce matériel d'un poids total d'environ 9,5 kg, est posé sur le dévidoir. Ces gestes sont réalisés en environ quarante cinq secondes.

Le dévidoir mobile est ensuite tiré sur soixante mètres, ce qui correspond à la longueur des tuyaux déroulés. Cette manœuvre qui est réalisée en binôme, dure environ cent vingt secondes.

Arrivé au pied d'une cage d'escaliers, le sujet pose le dévidoir et saisit la commande en sac, deux tuyaux et la lance puis, effectue la reconnaissance d'une chambre au rez-de-chaussée. Ensuite, il monte plusieurs volées de marches jusqu'au deuxième étage, et s'engage dans un couloir long d'une dizaine de mètres. Devant la porte du volume en feu, il pose la lance à incendie et, en sens inverse il déroule les deux tuyaux jusqu'au pied des escaliers (au rez-de-chaussée). Là, il raccorde les tuyaux à une division qui aura été mise en eau par un autre pompier et remonte les marches pour se rendre devant la porte du volume en feu. Selon la vitesse d'exécution du porte-lance, la mise en eau de la lance à incendie peut durer environ quatre cent vingt secondes.

La séquence C correspond aux actions menées pendant l'attaque du feu. Lors de celle-ci, le sapeur-pompier est confronté à une modification de l'environnement thermique, avec des températures ambiantes très élevées et l'augmentation de l'humidité relative de l'air à la suite de l'action des lances à eau.

Arrivé devant l'entrée du volume embrasé, le porte-lance coiffe le masque de son ARI, ouvre la porte, attaque le feu. Lors de cette séquence, le sapeur-pompier pénètre en position accroupie dans le volume en feu ; il applique le devoir du porte-lance (BSPP, 2004).

Dans le local, la température moyenne est voisine de 320°C au plafond et entre 60°C et 80°C à 0,5 m du sol. Au bout de quatre minutes, le feu est éteint dans une première pièce, il s'est néanmoins propagé à une seconde pièce située à l'étage supérieur.

La manœuvre d'extinction se poursuit. Le porte-lance hisse ses tuyaux au niveau supérieur en empruntant un escalier en colimaçon, étroit et constitué d'un volet de quinze marches. La durée de cet effort est d'environ cent vingt secondes.

A cet étage, le porte-lance est confronté au même environnement thermique qu'en-dessous. L'attaque du foyer dans ce deuxième volume embrasé débute dès que le porte-lance est en position accroupie ou à genoux.

La durée de l'attaque relève soit de critères physiologiques relatifs au porteur de l'ARI, soit de critères techniques avec le volume d'air disponible. Le feu sera considéré comme éteint lorsque l'un des deux critères précités sera atteint.

La durée d'extinction du feu dans la première pièce a été fixée arbitrairement à quatre minutes pour des raisons techniques liées à l'installation « maison du feu » (qui sera décrite au chapitre 5)

Contrairement aux résultats attendus par les tests sur l'homme, la simulation d'une manœuvre de lutte contre le feu, avec un logiciel de calculs, même si elle est découpée en séquences de travail simples, n'intègre pas le comportement physiologique du soldat du feu. De ce fait, c'est la durée calculée de l'autonomie théorique de la bouteille d'air qui donne l'heure de fin de la simulation (Warmé-Janville (b), 2003).

Pour un appareil respiratoire isolant (ARI) bi-bouteilles, le volume total maximal des deux bouteilles de quatre litres chacune gonflées à 200 bar est d'environ 1 544 litres d'air respirable.

Ce volume est cependant ramené à 1040 litres d'air respirable disponible, car l'appareil est muni d'un dispositif de sécurité qui se déclenche lorsque la pression de la bouteille atteint 70 bar (BSPP/BEG (a)(b), 1996 ; 2003). Dès le déclenchement du dispositif de sécurité, le porte-lance se désengage du local en feu.

Pour un ARI mono-bouteille, le volume total maximal de la bouteille de neuf litres gonflée à 300 bar, est d'environ 2637 litres d'air respirable. Cette autonomie est ramenée à 2070 litres d'air disponible avant le déclenchement du dispositif de sécurité.

Avec un volume d'air disponible de 1040 litres, un porte-lance qui consomme 40 litres d'air par minute, dispose techniquement d'une autonomie de vingt-six minutes. Avec un volume d'air de 2070 litres, cette autonomie théorique est d'environ cinquante-deux minutes. Parmi les hypothèses nécessaires à la simulation, la valeur de 40 litres d'air par minute est considérée comme une estimation pour un effort soutenu (Warmé-Janville (b), 2003). Lors des essais sur l'Homme, cette variable inter-individuelle permettra d'estimer avec une meilleure précision la limite d'engagement sous protection respiratoire.

Le scénario opérationnel a été défini afin que les gestes réglementaires puissent être reproduits avec des conditions techniques et environnementales identiques ; la répétition des efforts pendant toute la durée des tests devant permettre d'estimer la contrainte moyenne subie par le porte-lance. Enfin, la manœuvre se compose d'exercices physiques avec des déplacements horizontaux et verticaux dans les escaliers, de portage de charges, de tirés de tuyaux, dans un environnement neutre, et d'exercices avec des déplacements légers souvent en position accroupie avec le port de charges et des tirés de tuyaux en charge (remplis d'eau sous pression) dans un environnement extrême avec des variations instantanées de températures radiantes et d'humidité relative dans l'air.

Lors de cette étape, les phases de récupération entre d'éventuels engagements successifs et des opérations de déblayage et de dégarnissage des parties brûlées n'ont pas été simulées. Cela correspond à une séquence « passive » D.

4.1.2.4. Résultats des simulations du scénario « laboratoire » en ambiance thermique modérée

Pour effectuer les simulations, le gabarit standardisé du sapeur-pompier a été fixé arbitrairement, il correspond aux mensurations du mannequin thermique, c'est-à-dire à une taille de 1,75 m pour 70 kg (Warme-Janville et al., 1999).

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Protect®.

4.1.2.4.1. Influence de la masse des équipements sur le coût métabolique

Le coût métabolique nécessaire à la réalisation de l'effort correspondant au scénario laboratoire pour un sujet habillé avec la tenue de base, dont le poids est 3,45 kg, sans tenue d'intervention, ni protection respiratoire et sans lance ni tuyaux, est estimé à environ 380 W (199 W/m^2) (Warmé-Janville (b), 2003).

Lorsque le sujet enfile l'équipement E1, dont la masse totale avec la lance à incendie est d'environ 24,1 kg, le coût métabolique nécessaire pour la réalisation de l'exercice est estimé à 489 W (256 W/m^2), soit un surcoût métabolique de 109 W c'est-à-dire d'environ 28,7 %. Avec l'équipement E2Co, dont la masse totale avec la lance à incendie est d'environ 21,4 kg, le coût métabolique est estimé à environ 474 W (248 W/m^2), ce qui correspond à un surcoût d'environ 24,7 % ou de 94 W. La répartition de ce surcoût physiologique est présentée par la figure 4.2 pour les deux équipements.

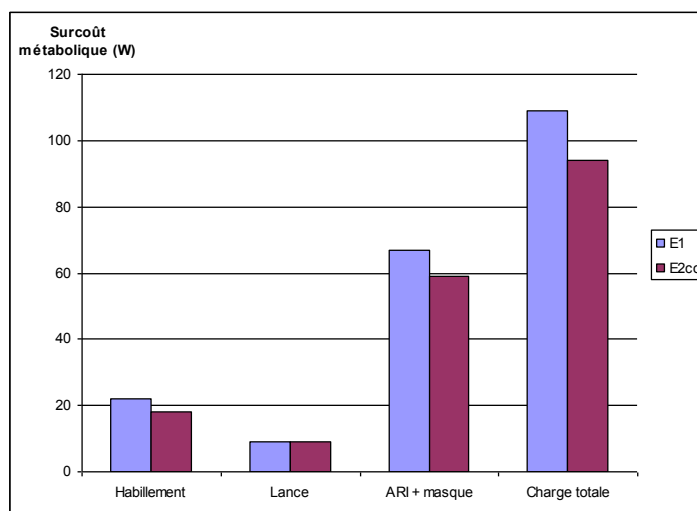


Figure 4.2 : Surcoût physiologique dû aux équipements E1 et E2Co

Le surcoût est en grande partie lié à la masse de l'appareil respiratoire ; l'ARI mono-bouteille occasionne à lui seul un surcoût métabolique d'environ 15,5 %, avec l'appareil bi-bouteille, il atteint environ 18%.

Les travaux de Melin (Melin et al., 2004), (Scherrer, 1981) préconisent que la masse des équipements individuels ne soit pas supérieure à un tiers du poids du corps du militaire afin que ce dernier garde une capacité opérationnelle optimale pendant une activité de longue durée. Or, si l'on considère un sujet mesurant 1,65 mètre pour 60 kg - ce qui correspond aux limites inférieures des critères physiques de sélection de la brigade - le surcoût métabolique avec l'équipement E1 est de 38 % et avec l'équipement E2Co, de 32,9 %.

La masse de l'ensemble des nouvelles protections, permet à un sujet dont les caractéristiques morphologiques correspondent aux critères minimaux de sélection, de répondre à cette préconisation, car le surcoût métabolique reste inférieur à 33 %. On retiendra, pour ce cas de figure, que l'ARI à lui seul, nécessite un surcoût métabolique d'environ 20,2 %.

On observe ainsi, que l'écart des masses de 10%, constaté lors du bilan des caractéristiques des équipements, se traduit par une différence d'environ 16% en termes de surcoût physiologique. On peut en conclure que le poids des équipements agit de façon non négligeable sur la charge de travail des sapeurs-pompier. (Davis et Santa Maria, 1975) ont ainsi mis en évidence que les protections portées par les soldats du feu généraient une augmentation de 27% de la fréquence cardiaque, de 33% de la consommation d'oxygène et de 33% de la ventilation pulmonaire.

4.1.2.4.2. Evolution des DLE « thermiques » et « hydratation » en fonction de la charge de travail

La figure 4.3 représente l'évolution des différentes durées limites d'exposition DLE « thermiques » et « hydratation » en fonction de l'intensité de la charge de travail, évaluée par modèle de la norme ISO 7933 dans un environnement climatique modéré avec une température de l'air de 25°C (Sagot, 2002) et une humidité relative de l'air de 45%.

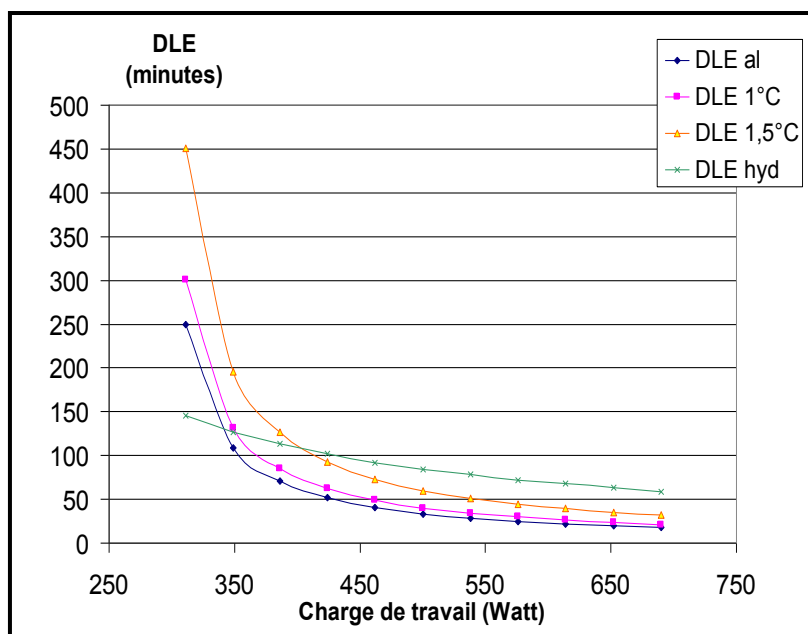


Figure 4.3 : Evolution des limites de sécurité en fonction de l'intensité de la charge de travail

Quatre courbes correspondant aux seuils d'alerte et de danger définis précédemment matérialisent les niveaux de risque.

Quelle que soit la tenue d'intervention portée, l'intensité de l'activité physique et la dépense énergétique qui lui est associée sont les facteurs limitants.

Dès lors que la charge de travail dépasse 480 W, ce qui correspond par exemple, au déplacement d'un porte-lance à 4 km/h, équipé de l'ARI (AFNOR/ISO 8996, 2004), les écarts entre les différents seuils d'alerte et de danger se réduisent rapidement. Lorsque la charge métabolique est inférieure à cette valeur, on constate que le porte-lance équipé de l'ARI mono-bouteille, sera en limite d'autonomie avant d'atteindre les seuils d'alerte et de danger de l'hypothermie, soit environ 52 minutes.

Dans cette ambiance thermique modérée, la DLE correspondant aux seuils d'alerte et de danger pour un pompier effectuant un effort soutenu d'environ 650 W, comme par exemple lorsqu'il tire un dévidoir chargé, dont le poids total est d'environ 70 kg (AFNOR/ISO 8996, 2004), est inférieure à 40 minutes.

Enfin, on peut estimer que si un effort similaire est réalisé dans une atmosphère surchauffée, comme lors de l'attaque du feu, la charge thermique viendra aggraver la contrainte thermique subie par le porte-lance et encore réduire la durée limite d'exposition préconisée.

Pour valider cette dernière estimation, d'autres simulations numériques ont été réalisées en faisant varier les paramètres physiques ambiants suivants :

- la température sèche de l'air ;
- la température moyenne de rayonnement ;
- l'humidité de l'air.

4.1.2.4.3. Evolution de la DLE en fonction des conditions ambiantes

La figure 4.4 représente une estimation des limites de sécurité thermique (DLE 1.5°C en bleu) et de déshydratation (en rose) en fonction de la température de l'air pour une charge de travail de 480 W, avec un taux d'hygrométrie de 45%.

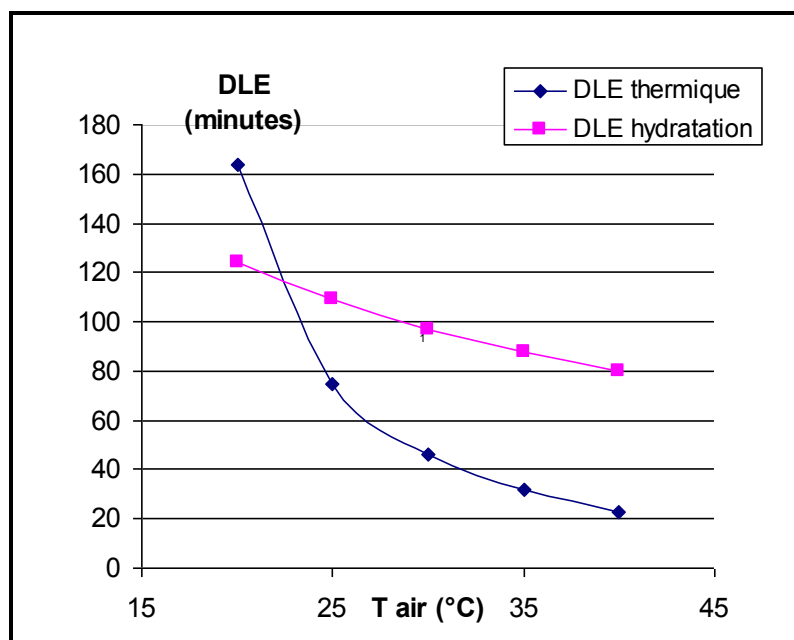


Figure 4.4 : Evolution des limites de sécurité en fonction de la température ambiante

On constate qu'un porte-lance effectuant un effort d'environ 480 W sous une température ambiante modérée de 25°C, dispose d'une durée limite d'exposition d'environ 75 minutes avant d'atteindre le seuil de danger relatif à une élévation de température centrale. Mais comme cette durée est supérieure à l'autonomie théorique offerte par l'ARI (52 minutes environ), l'alarme sera donnée par le sifflet de fin de charge de la protection respiratoire. Par contre au-delà d'une température moyenne de 27°C, les seuils d'alerte et de danger physiologiques seront atteints avant que le porte-lance ne soit en dette d'air respirable en raison d'un volume d'air disponible insuffisant.

La figure 4.5 montre une estimation des limites de sécurité en fonction de la température radiante pour une charge de travail de 480 W, avec un taux d'hygrométrie de 45%.

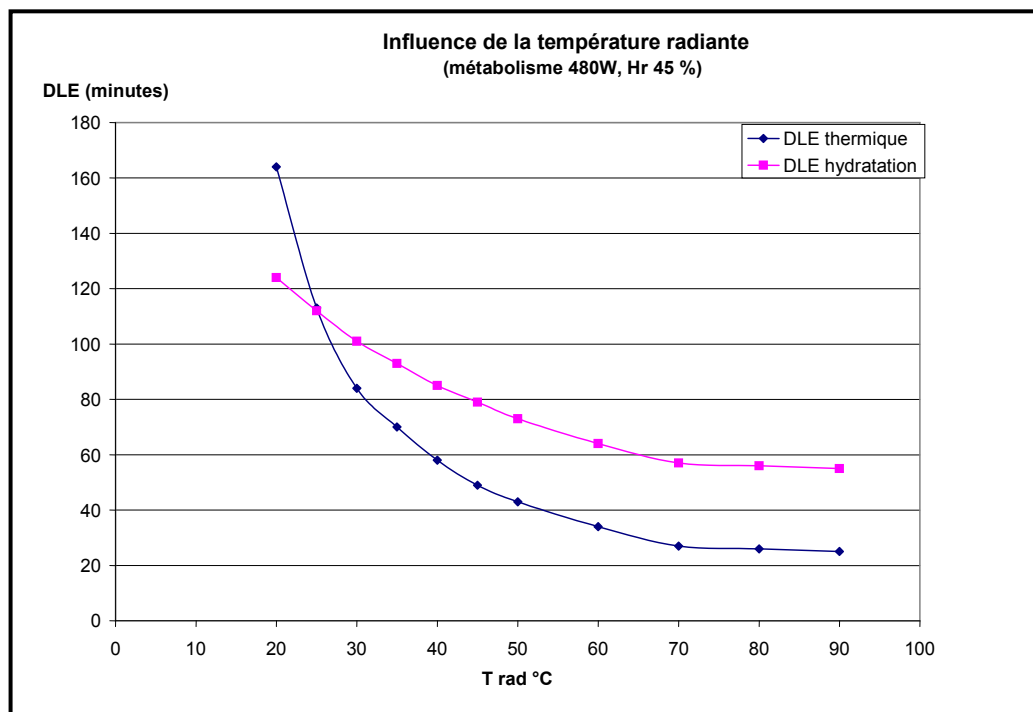


Figure 4.5 : Evolution des limites de sécurité en fonction de la charge radiante

On constate que le rayonnement thermique est un facteur aggravant qui influe très fortement sur les durées limites d'exposition. Lorsque le porte-lance pénètre dans un volume en feu, il est rapidement soumis aux effets thermiques. En adoptant la position accroupie ou à genoux, il évolue généralement dans de la fumée et dans une veine d'air chaud pouvant aller de 60 à 90°C (DDSC, 2003 ; BSPP-BOPE (a), 2005). S'il était debout, il subirait des températures supérieures à 320°C (DDSC, 2003).

Or à partir d'une température radiante de 45°C, la durée limite d'exposition, avant de subir les effets de la contrainte thermique, est inférieure à l'autonomie théorique de l'ARI. A partir de 65°C, la DLE est proche de 30 minutes.

La figure 4.6 donne une estimation de la durée limite d'exposition selon le taux d'hygrométrie relative.

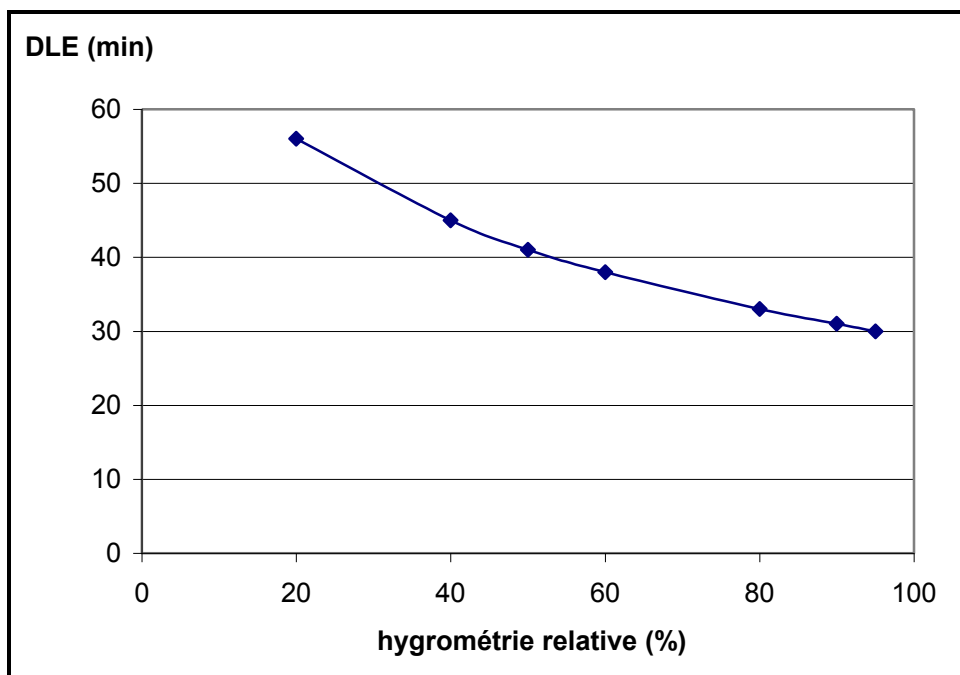


Figure 4.6 : Evolution de la limite de sécurité en fonction de l'hygrométrie relative

L'hygrométrie relative de l'ambiance dans laquelle évolue le pompier influe directement sur l'efficacité du refroidissement sudoral, et par conséquent sur la durée limite d'exposition admissible.

Pour un exercice donné d'environ 480 W et sous une température de l'air de 25°C, on observe que la DLE passe d'environ 57 minutes à environ 30 minutes selon l'augmentation du taux d'humidité relative dans l'air.

Dans un environnement beaucoup plus chaud comme lors d'une opération de lutte contre le feu, et/ou lorsque la charge moyenne de travail est supérieure à 480 W, le porte-lance est confronté à d'importantes variations du taux d'hygrométrie.

Il passe en quelques minutes d'une température ambiante extérieure neutre à une ambiance sèche avec un taux d'humidité relative d'environ 20% lorsqu'il pénètre dans le volume en feu

puis, à un environnement saturé en humidité avec un taux d'hygrométrie relative proche de 95% lorsque le feu est éteint.

Le logiciel de simulation ne permet pas la variation simultanée des différents paramètres de l'ambiance thermique. On retiendra tout de même, que la température radiante et le taux d'hygrométrie sont des facteurs qui influent directement sur la durée limite d'exposition.

Dans le cadre des simulations réalisées, la température réaliste d'un rayonnement de 60°C, la durée limite d'exposition est environ égale à la moitié de la durée de l'autonomie offerte par un ARI mono-bouteille. En constate aussi que l'augmentation de l'humidité relative de l'air réduit considérablement la DLE.

La mise au point d'un logiciel capable d'intégrer la variation simultanée des différents paramètres d'ambiance et de la charge métabolique correspondant à l'effort simulé, permettrait de mesurer l'interaction de ces paramètres et apporterait plus de précision sur les durées limites d'exposition avant que le porte-lance ne soit soumis à une astreinte thermique susceptible de générer un danger.

4.1.2.4.4. Simulation du scénario laboratoire avec Protect®

La figure 4.7 simule l'évolution de la fréquence cardiaque pour un sujet réalisant l'exercice en laboratoire. Pour les deux types d'équipement portés, les tracés sont semblables et ont la même allure. Seuls de faibles écarts apparaissent pour les valeurs maximales et minimales selon le type d'équipement porté. Ainsi, on observe que la fréquence cardiaque augmente avec la durée de l'effort pour atteindre une valeur maximale d'environ 177 battements par minute à la fin de l'exercice, avec l'équipement E1 et environ 167 battements par minute avec l'équipement E2Co. Etant donné que l'équipement E1 est plus lourd que l'équipement E2Co, les résultats de cette simulation sont logiques.

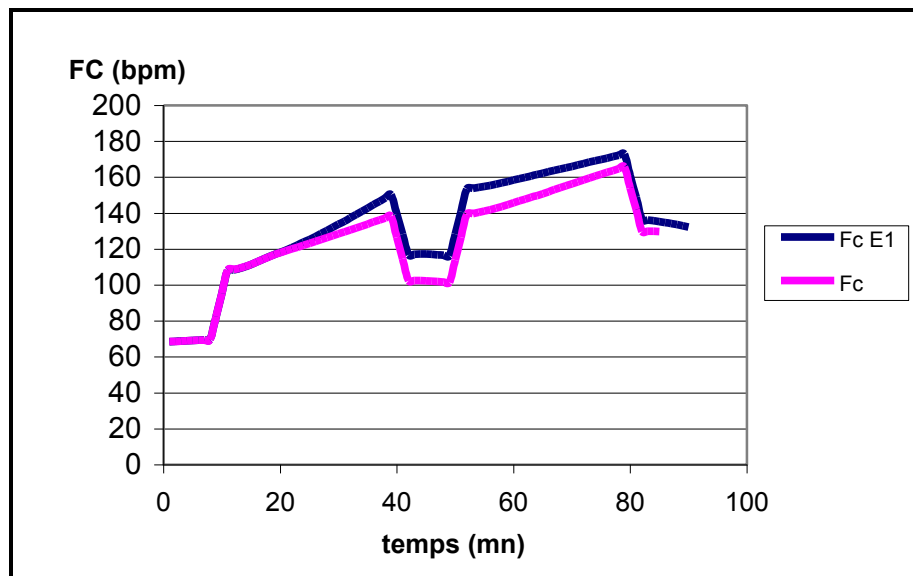


Figure 4.7 : Evolution de la fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque maximale mesurée à la fin de l'exercice pour l'un ou l'autre équipement n'est pas très élevée, ce qui confirme que l'entraînement physique effectué quotidiennement par les sapeurs-pompiers est un gage de sécurité.

Les figures 4.8 et 4.9 représentent une simulation de l'évolution de la température centrale et cutanée pour les deux types d'équipement.

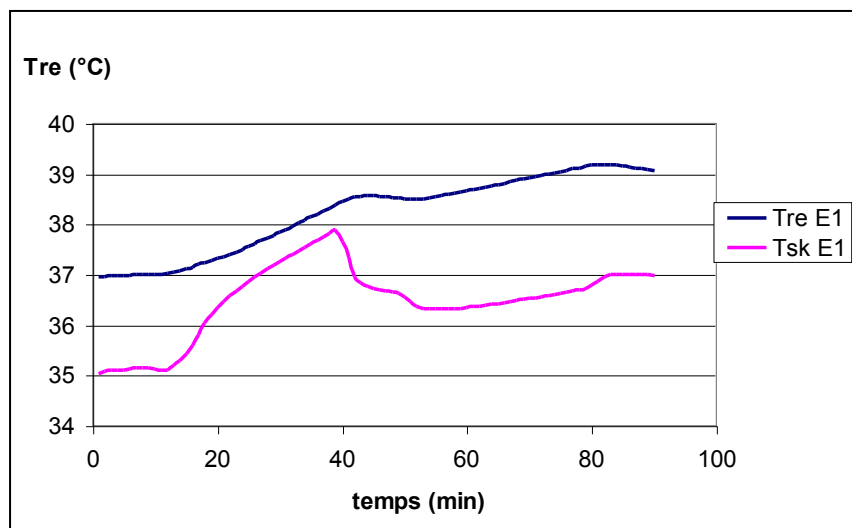


Figure 4.8 : Evolution de la température interne et cutanée avec l'équipement E1

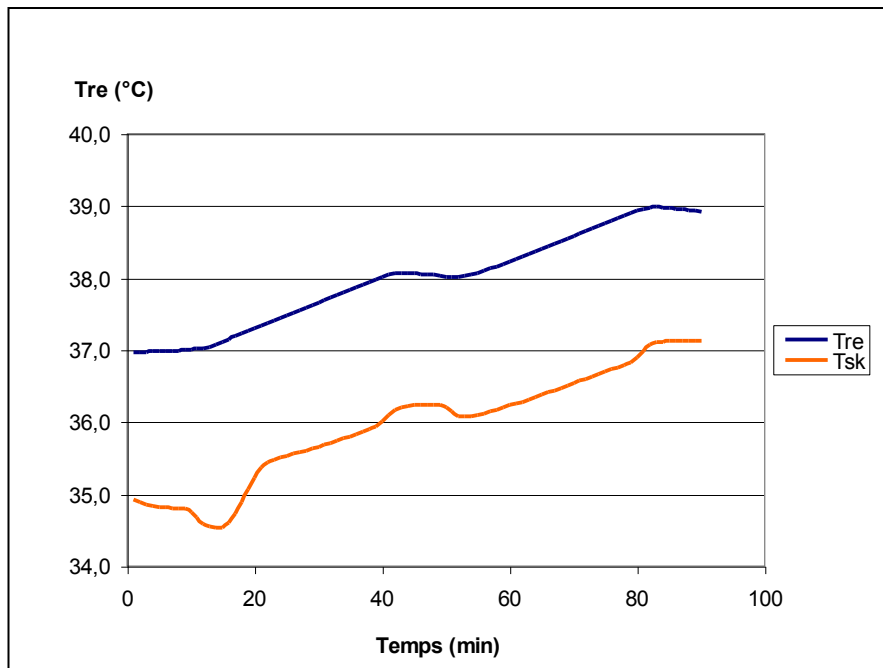


Figure 4.9 : Evolution de la température interne et cutanée avec l'équipement E2Co

Pour la température centrale, on observe que les deux courbes sont très proches avec une valeur maximale estimée à 39,2°C pour l'équipement E1 et 39,0°C pour l'équipement E2Co. L'écart entre les deux simulations numériques est négligeable.

4.1.2.5. Résultats des simulations du scénario opérationnel avec le logiciel Predictol

Les simulations numériques relatives au scénario opérationnel ont été réalisées au CRSSA, avec le logiciel « Predictol ».

4.1.2.5.1 Scénarios opérationnels simulés

A partir du scénario opérationnel décrit au paragraphe 4.1.2.3., trois variantes opérationnelles ont été incluses de façon à tenir compte notamment du fait que la contrainte thermique n'est pas identique selon que le sujet est initialement en phase de repos (variante1) ou de travail intense (variante2).

De plus, comme l'objectif de ces travaux est de déterminer la durée maximale d'engagement en continu d'un porteur à l'attaque du feu sans qu'il y ait de changement de bouteille de l'ARI, ou si un second engagement était nécessaire, de déterminer la durée maximale de celui-ci.

Enfin dans l'éventualité de ce second engagement, d'estimer la durée et les conditions du repos nécessaire entre ces deux, il est intéressant de simuler une opération complémentaire de déblaiement, nécessitant à nouveau le port de l'ARI (variante 3).

Aussi, les trois variantes proposées dans le tableau 4.33 ont été simulées.

Le logiciel Predictol n'étant initialement pas conçu pour l'usage qu'il en fait dans cette thèse, un certain nombre d'hypothèses sur la durée des séquences ainsi que la charge et les conditions thermiques ont dû être faites, elles apparaissent dans la dernière colonne du tableau.

Tableau 4.3 : Scénarios opérationnels simulés avec Predictol

Sé- quen- ces	Description des tâches à effectuer lors de la manœuvre	Principaux paramètres de simulation et durée associée aux séquences de la simulation – Variante 1	Principaux paramètres de simulation et durée associée aux séquences de la simulation – Variante 2	Principaux paramètres de simulation et durée associée aux séquences de la simulation – Variante 3
A	<u>Position de départ</u> : variable selon les scénarios <u>Alerte</u> : le sujet se déplace rapidement (au pas de course) sur un nombre de mètre variable pour rejoindre le véhicule. Il monte dans le véhicule et il enfle la veste d'intervention et le casque (poids total du sujet équipé des vêtements d'intervention 8,13kg)	<u>Position de départ</u> : pas d'activité physique avant l'alerte, le sujet termine son déjeuner. Il court sur 80 m M = 235 W/m² Durée = 6 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 8.1kg	<u>Position de départ</u> : Le sujet est en séance de sport. Il a couru pendant 20 minutes à 10 km/h. Au moment de l'alerte, il sprinte sur 200 mètres pour rejoindre le véhicule. M = 427 W/m² Durée = 24 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 2kg	<u>Position de départ</u> : Le sujet est en séance de sport. Il a couru pendant 20 minutes à 10 km/h. Au moment de l'alerte, il sprinte sur 200 mètres pour rejoindre le véhicule. M = 427 W/m² Durée = 20 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 2kg
A	<u>Déplacement en véhicule</u> : le sujet est assis (durée du trajet : 6 minutes)	M = 58 W/m² Durée = 6 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 8.1kg	id	id
B	<u>Arrivée sur les lieux de l'incendie</u> : le sujet descend du véhicule avec l'ensemble des équipements de protection. Il se rend à l'arrière du véhicule décroche un dévidoir mobile (poids 51 kg) et saisit 2 tuyaux et une lance à incendie (17,5 kg) qu'il pose sur le dévidoir. (45 s) Il tire le dévidoir mobile sur 80 mètres (manœuvre réalisée par 2 personnes) (120 s)	M = 269 W/m² Durée = 6 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 40kg	id	id
B	Au pied de la cage d'escaliers il pose le dévidoir et saisit les 2 tuyaux et la lance (poids 17,5 kg), il monte 4 volets de marches (environ 30 marches) et s'engage dans un couloir sur 10 mètres. (2 étages) Devant la porte du volume en feu, il pose la lance à incendie et en sens inverse il déroule les 2 tuyaux jusqu'au pied des escaliers. Là, il raccorde les tuyaux à une division qui aura été mise en eau par un autre pompier. Il remonte les marches pour se rendre devant la porte du volume en feu. Jusqu'à ce stade, la manœuvre est effectuée à température ambiante.	M = 523 W/m² Durée = 6 min HR = 30% Pente = 60% Charge = 40kg	id	id

C	Arrivé devant la porte, il coiffe le masque de l'appareil respiratoire, la lance est en eau et le sujet pénètre dans la pièce en feu en position accroupi. Dans la pièce la température est alors à environ 350°C au plafond et à 80°C à 50cm du sol. Au bout de 4 minutes le feu est éteint. Pendant cette première attaque le sujet s'est déplacé en position accroupi en tirant la lance avec les tuyaux sur 5 mètres. Au bout de 3 minutes l'humidité relative dans la pièce est très élevée (supérieure à 80%). Le feu s'étant propagé à l'étage au-dessus la manœuvre se poursuit. Donc après les 4 minutes, le sujet tire la lance en eau à l'étage au-dessus par un escalier en colimaçon (étroit avec 15 marches) pendant 2 minutes. Dans la pièce à l'étage supérieur la température est également d'environ 380°C sous le plafond et d'environ 80°C à 50cm du sol. Cette seconde attaque du feu dure 24 minutes avec plusieurs déplacements d'environ 3 mètres (3 fois 3 mètres). Au bout de 24 minutes le feu est considéré comme éteint. Une chaleur rayonnante subsiste et l'humidité est très élevée.	M = 98 W/m² Durée = 24 min HR = 100% Pente = 0% Charge = 40kg	id	id
C	Le sujet sort de la pièce (déplacement 10 mètres) pour être à l'air libre. Il descend les escaliers (30 marches) se rend au véhicule (80 mètres) et pose son appareil respiratoire (moins 14,34 kg). Il s'assoit ouvre ses vêtements et se réhydrate (repos pendant 30 minutes)	M = 158 W/m² Durée = 1 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 40kg		Non réalisé
D	Repos pendant 30 minutes	Non réalisé	Non réalisé	M = 158 W/m² Durée = 30 min HR = 30% Pente = 0% Charge = 40kg
D	Le sujet avec son appareil respiratoire s'engage dans une phase de dégarnissage, il remonte donc dans les deux pièces où le feu est éteint mais où le rayonnement est toujours perceptible et avec une forte humidité. Le sujet tient une hachette (poids 3,5 kg) et une pelle (poids 3,5 kg), il procède pendant 15 minutes à un dégarnissage des boiserries et il remplit un conteneur « poubelle ».	Non réalisé	Non réalisé	M = 117 W/m² Durée = 15 min HR = 100% Pente = 0% Charge = 20.6kg
D	Après 15 minutes, il descend la poubelle pleine (50 kg sur roulettes) par les escaliers (30 marches) et les couloirs (15 mètres).	Non réalisé	Non réalisé	M = 119 W/m² Durée = 6 min HR = 100% Pente = 6% Charge = 27.6kg

4.1.2.5.2. Résultats des simulations

Ces simulations ont fait l'objet d'un rapport spécifique (Savourey et Jacques, 2005). Aussi, seuls les principaux résultats sont rappelés dans cette thèse dans les tableaux 4.4 et 4.5 respectivement pour les variantes 1 et 2 puis 3.

Tableau 4.4 : Résultats de Prédicтол pour les variantes 1 et 2

Séquences	Contrainte estimée	Résultats	Alarme stockage	Danger Stockage	Extrême Danger Stockage	STANAG Stockage	Alarme Déshydratation	Danger Déshydratation
A1	Contrainte thermique chaude	Risque Faible, Peu de risque de déshydratation	8 min	8 min	8 min	8 min	6 min 17s // 5min	8 min // 6 min 40s
A2	Peu ou pas de contrainte thermique	Equilibre thermique, Risque inexistant	-	-	-	-	-	-
B1	Contrainte thermique chaude	Risque faible, peu de risque de contrainte thermique	4 min 16s	5 min 08s	5 min 59s	7 min 42s	5 min 13s	6 min 57s
B2	Contrainte thermique chaude	Risque faible, peu de risque de contrainte thermique	16 min	19 min	22 min	29 min	5 min 01s	6 min 42s
C1	Contrainte thermique chaude	Extrême danger, Risque très important de contrainte thermique	14 min	16 min	19 min	24 min	8h00	8h00
C2	Contrainte thermique chaude	Risque faible, peu de risque de contrainte thermique	1 h 23 min	1 h 40 min	1 h 57 min	2 h 30 min	5 h 34 min	7 h 26 min

Tableau 4.5 : Résultats de Prédicтол pour la variante 3

Séquences	Contrainte estimée	Résultats	Alarme stockage	Danger Stockage	Extrême Danger Stockage	STANAG Stockage	Alarme Déshydratation	Danger Déshydratation
A1	Contrainte thermique chaude	Risque Faible, Peu de risque de déshydratation	8 min	8 min	8 min	8 min	5 min	6 min 40s
A2	Peu ou pas de contrainte thermique	Equilibre thermique, Risque inexistant	-	-	-	-	-	-
B1	Contrainte thermique chaude	Risque faible, peu de risque de contrainte thermique	4 min 16s	5 min 08s	5 min 59s	7 min 42s	5 min 13s	6 min 57s
B2	Contrainte thermique chaude	Risque faible, peu de risque de contrainte thermique	16 min	19 min	22 min	29 min	5 min 01s	6 min 42s
C1	Contrainte thermique chaude	Extrême danger, Risque très important de contrainte thermique	14 min	16 min	19 min	24 min	8h00	8h00
C2	Contrainte thermique chaude	Danger, risque important de contrainte thermique	24 min	29 min	34 min	43 min	5 h 34 min	7 h 26 min
D1	Contrainte thermique chaude	Risque Majeur, Risque excessif de contrainte thermique	7 min	8 min	9 min	12 min	8 h 00 min	8 h 00 min
D2	Contrainte thermique chaude	Risque Majeur, Risque excessif de contrainte thermique	2 min	3 min	3 min	4 min	8 h 00 min	8 h 00 min
D3	Contrainte thermique chaude	Extrême danger, Risque très important de contrainte thermique	37 min	45 min	52 min	1 h 07 min	5 h 34 min	7 h 26 min

En conclusion, les simulations sur Prédiccol ont mis en évidence que le porte-lance pouvait réaliser les différentes séquences de la manœuvre sans encourir de risques pour sa santé, tant que l'engagement se situait entre 20 et 29 minutes, même si la manœuvre était précédée d'une activité physique (variante 2). Par contre, comme le présentent les résultats de la simulation de la variante 3, il a été observé que même après un repos d'environ 30 minutes, la contrainte thermique était très rapidement ressentie par le porte-lance lors d'un second engagement. Les résultats obtenus semblent réalistes, notamment ceux de la simulation de la variante 3, car bien qu'étant en phase de repos, si le sujet ne se réhydrate pas et ne se refroidit pas en se dévêtant le stockage thermique accumulé lors des exercices restera très important. Il convient donc, lors de la phase de repos entre les engagements d'arrêter tout effort, de se réhydrater, de s'aérer et même de changer de polo, afin que les échanges thermiques entre le corps et l'environnement puissent se faire correctement.

Toutefois, les modèles n'étant qu'une représentation de la réalité et les hypothèses de simulation ayant été nombreuses, les essais conduits sur l'Homme sont réalisés avec un niveau de difficulté croissante en débutant par des tests en laboratoire sur tapis motorisé.

4.2. Essais sur l'Homme en laboratoire sur tapis motorisé

En raison du faible nombre d'études argumentées sur l'estimation des limites d'engagement du porte-lance au feu (Finteis et al., 2003 ; Kortt et al., 2003 ; Pham et al. 2005), et du manque de références en la matière, les tests conduits sur l'Homme par la brigade présentent deux niveaux de difficultés croissants : des essais en laboratoire sur tapis roulant puis en conditions réelles de lutte contre un sinistre.

Les essais sont réalisés au laboratoire¹⁰ « ergonomie de la protection » du Centre d'Etudes du Bouchet (91).

Il s'agit d'évaluer sur des sapeurs-pompiers équipés de différents types de tenue d'intervention, l'astreinte thermique pendant un exercice sur un tapis roulant motorisé, par des mesures physiologiques. Différents auteurs (Marchand et al., 2006 ; Ftaiti et al. , 2001 ; Tattersall et Thomas, 1985 ; Tack et al. 1984) ont procédé de façon similaire pour comparer ou tester différents types de vêtements de protection.

¹⁰ Ce laboratoire est agréé n° 10076S par le ministère de la santé et de la solidarité

4.2.1. Protocole expérimental

4.2.1.1. Les sujets

En application des règles relatives à la protection des personnes se prêtant à la recherche biomédicale sans bénéfice individuel direct, les sujets, tirés au sort parmi 18 candidats volontaires, ont été informés des buts et des moyens mis en œuvre pour ces travaux (Bugat, 1999). Aptes à servir en unité opérationnelle de la brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris, en bonne condition physique et avec une ancienneté de service d'environ dix-huit mois, ils sont formés aux fonctions de « sapeur servant » ou de « chef d'équipe » selon les règlements en vigueur à la brigade (BSPP, 2004)

Huit sapeurs-pompiers (hommes et femmes) dont les caractéristiques biométriques figurent dans le tableau 4.6 ont participé à ces mesures (Havenith, Heus ; 2004).

Tableau 4.6 : Caractéristiques biométriques des sujets

Sujets	Age (années)	Taille (m)	Poids (kg)	Surface corporelle (m ²)
1	27	1,75	70,7	1,86
2	24	1,77	67,8	1,84
3	23	1,73	63,8	1,77
4	25	1,79	79,3	1,99
5	26	1,75	75,0	1,91
6	25	1,78	74,2	1,92
7	22	1,70	63,4	1,74
8	20	1,73	65,3	1,78

Ces caractéristiques biométriques permettent d'établir une moyenne et un écart-type :

- l'âge moyen des sujets est de 24 ans avec un écart-type de 2,12 ;
- le poids moyen des sujets est de 69,9 kg avec un écart-type de 5,7 ;
- la taille moyenne des sujets est de 1,75 m avec un écart-type de 0,03 ;
- la surface corporelle moyenne est de 1,85 m² avec un écart-type de 0,08.

Chaque sujet a réalisé deux essais, l'un avec l'équipement E1, l'autre avec l'équipement E2Co. Le passage avec chacune de ces deux tenues a été randomisé et deux passages sont séparés d'au moins 24 heures. L'ensemble de l'expérimentation s'est déroulé en deux séries pendant une durée totale de dix jours.

4.2.1.2. Evaluation de l'astreinte thermique par des mesures physiologiques

La méthode de travail, utilisée depuis plus de dix ans au CEB ou au CRSSA (Melin et al. 1999) est celle qui est appliquée pour les études d'ergonomie opérationnelle concernant les équipements de protection. Elle a pour but de rechercher le meilleur compromis entre ergonomie et protection et les limites de sécurité afin de préserver l'intégrité de l'utilisateur travaillant en situation extrême, à partir de la mesure des quatre grandeurs suivantes :

- la température de noyau central du corps ;
- les températures cutanées ;
- la fréquence cardiaque ;
- la perte de poids.

4.2.1.2.1. Mesure de la température du noyau central du corps, t_{cr}

Le terme « noyau » (« parties profondes ») fait référence à l'ensemble des tissus situés assez profondément pour ne pas être affectés par un gradient de température à travers les tissus superficiels. Toutefois, à l'intérieur du noyau, des différences de température sont possibles en fonction des métabolismes locaux, de la densité des réseaux vasculaires et des variations locales de débit sanguin. La température du noyau n'est donc pas une grandeur unique et mesurable en tant que telle. Cette température peut être approchée par la mesure de la température en différentes parties du corps (AFNOR/ISO 9886, 2004) :

- l'œsophage : température oesophagienne, t_{es} ;
- le rectum : température rectale, t_{re} ;
- le tractus gastro-intestinal : température intra abdominale, t_{ab} ;
- la bouche : température orale, t_{or} ;
- le tympan : température tympanique, t_{ty} ;
- le conduit auditif : température auriculaire, t_{ac} ;
- la température urinaire, t_{ur} .

En fonction de la technique adoptée, la température mesurée peut refléter la température moyenne de la masse corporelle ou la température du sang irrigant le cerveau et dès lors influençant les centres de thermorégulation de l'hypothalamus. Cette température est habituellement considérée comme décrivant l'astreinte thermique subie par le sujet.

Dans le cadre de ces exercices, le choix porte sur la mesure de la température rectale. L'opération est réalisée à l'aide d'une thermistance YSI de la série 4000 à usage unique, introduite à 100 mm au minimum au-delà de la marge anale. Cette sonde qui dispose d'une faible capacité thermique, assure une précision de 0,1°C dans la gamme de 33°C à 43°C.

Son temps de réponse, à 90% de la valeur, est très faible et inférieur à trente secondes. Elle est reliée à une centrale portable de mesure et d'enregistrement HTM 8000 accessible visuellement aux expérimentateurs.

4.2.1.2.2. Mesure de la température cutanée, t_{sk}

La température mesurée à la surface de la peau varie fortement sur toute la surface corporelle et ce d'autant plus que les conditions ambiantes sont froides.

Pour cette raison, on distingue :

- la température cutanée locale, t_{sk} , mesurée en un point précis de la surface corporelle ;
- la température cutanée moyenne, $t_{sk(moy)}$, sur la surface entière du corps, qui est difficilement mesurable directement, mais qui peut être estimée en pondérant un certain nombre de températures cutanées locales en fonction des surfaces qu'elles caractérisent.

En elle-même, la température cutanée moyenne ne permet pas d'évaluer l'astreinte physiologique d'origine thermique. Elle constitue par contre, un critère important pour l'évaluation des conditions de confort thermique (AFNOR/ISO 9886, 2004).

Chez un sujet dévêtu, la température localisée sur la peau en un point, peut être mesurée à distance, à l'aide d'un capteur de rayonnement infrarouge. Cette technique donne la température moyenne sur la surface de la peau interceptée par le capteur.

Pour ces exercices, la température cutanée est mesurée par contact au moyen de thermistances YSI de la série 4000 à usage unique et fixées, selon la méthode de Ramanathan, respectivement au niveau du quart supérieur droit du thorax du sujet, sur la face externe du bras gauche, sur la face externe de la cuisse droite et sur la face externe du mollet gauche. La mesure est réalisée par des transducteurs ayant une précision de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ dans la gamme de 20°C à 45°C . Ces transducteurs disposent d'une faible capacité thermique, avec un temps de réponse, à 90% de la valeur, très faible et inférieur à trente secondes.

Lors de mesures par contact et afin de minimiser l'influence du climat extérieur, le capteur est fixé à plat au moyen d'une bande autocollante conductrice de la chaleur. L'estimation de la température cutanée moyenne à partir des températures locales mesurées et la comparaison des résultats obtenus s'appuient sur un schéma de pondération avec quatre points de mesure (AFNOR/ISO 9886, 2004).

La température cutanée est égale à la somme des températures cutanées multipliées par un coefficient de pondération correspondant à la localisation :

$$t_{sk} = \sum_i k_i t_{ski}$$

Où

t_{ski} est la température cutanée locale au $i^{ième}$ point de mesure ;

k_i est le coefficient de pondération pour le $i^{ième}$ point de mesure.

k_i est égal à 0,3 pour le thorax et les bras et à 0,2 pour la cuisse et le mollet



Figure 4.10: Sondes de température (photo CEB)

Les quatre capteurs (cf Figure 4.10) sont reliés à une centrale portable de mesure et d'enregistrement HTM 8000 (LE2IM), qui fournit en continu l'ensemble des températures physiologiques du sujet à un système de contrôle. A partir des températures cutanées moyennes et rectales, la température moyenne du corps est calculée permettant ainsi d'estimer le stockage thermique du corps pour chaque individu.

4.2.1.2.3. Mesure de la fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque, **HR**, sur un intervalle de temps Δt (en minutes) est définie par :

$$HR = n/\Delta t$$

Où n est le nombre de battements cardiaques observé durant cet intervalle de temps. Elle est exprimée en battements par minute (**bpm/min**). Cette valeur est généralement comptée pour des intervalles d'une minute.

A tout instant, la fréquence cardiaque, **HR**, peut être considérée comme étant la somme de plusieurs composantes qui ne sont pas indépendantes les unes des autres :

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_E$$

Où

- HR_0** est la fréquence cardiaque observée en moyenne au repos assis en conditions neutres, c'est-à-dire pour un niveau métabolique égal à 58 W/m² ;
- ΔHR_M** est l'élévation de la fréquence cardiaque liée au métabolisme de travail;
- ΔHR_S** est l'élévation liée aux efforts statiques développés;
- ΔHR_T** est la composante liée à l'astreinte thermique;
- ΔHR_N** est la composante nerveuse souvent observée chez le sujet au repos et qui tend à disparaître à l'effort;
- ΔHR_E** est la composante résiduelle liée au rythme respiratoire, cycle nyctéméral, etc. La composante respiratoire disparaît en grande partie lorsque le calcul de **HR** est réalisé sur un intervalle de temps de 30 secondes ou plus, tandis que la composante circadienne peut ici être négligée.

Ces composantes étant difficilement mesurables, la méthode la plus simple pour déterminer la fréquence cardiaque consiste à chronométrer un nombre de battements cardiaques au niveau de l'artère radiale ou de la carotide pendant une durée prédéterminée. Toutefois, ce comptage étant peu précis, le choix de l'enregistrement de l'électrocardiogramme est préféré pour les différents exercices. L'activité électrique cardiaque est recueillie par des électrodes intégrées dans une ceinture thoracique et transmise par télémetrie à un récepteur porté par le sujet..

Aujourd'hui, la cardiofréquencemétrie est de plus en plus utilisée par les médecins du travail pour estimer la charge relative d'un travail (Boudet, Chamoux, 2005), mais en raison d'un manque de procédés normalisés, l'interprétation des résultats est difficile et les confusions fréquentes.

4.2.1.2.4. Mesure de la variation de la masse corporelle due à la sudation

La variation brute de masse corporelle d'une personne au cours d'un intervalle de temps donné est la différence entre les masses corporelles mesurées en début et en fin d'intervalle (AFNOR/ISO 9886, 2004)

La variation brute de la masse corporelle, **Δm_g** , est la somme de plusieurs composantes :

$$\Delta m_g = \Delta m_{sw} + \Delta m_{res} + \Delta m_o + \Delta m_{wat} + \Delta m_{sol} + \Delta m_{clo}$$

Où :

- Δm_{sw} est la variation de masse due à la perte sudorale durant l'intervalle de temps donné;
- Δm_{res} est la variation de masse due à l'évaporation dans les voies respiratoires;
- Δm_o est la variation due aux différences de masse entre le dioxyde de carbone expiré et l'oxygène inspiré;
- Δm_{wat} est la variation de masse corporelle due à la prise d'eau et au rejet (urine) ;
- Δm_{sol} est la variation de masse corporelle due à la prise (nourriture) et au rejet (selles) de solides;
- Δm_{clo} est la variation de masse de vêtement due à une variation de ce vêtement ou à l'accumulation de sueur.

La perte de poids est mesurée, à l'aide d'une balance (Mettler KC 120J avec un moyennneur ID1S) avec la précision du gramme. La valeur est obtenue par une pesée différentielle avant et après l'exercice, d'un même pompier dévêtu puis complètement équipé. La différence de poids du sujet nu avant et après l'expérimentation permet de connaître l'importance de la perte hydrique au cours de l'essai. La différence de poids du sujet habillé permet d'estimer la quantité de sueur évaporée au travers de l'équipement dans le même laps de temps. Le rapport des deux variations de poids, nu et habillé, donne le pourcentage de sueur évaporée. Pendant l'exercice aucun aliment solide ou liquide n'est absorbé par le sujet.

Pour chaque essai, après miction, le sujet est pesé en slip avant de s'équiper de la sonde rectale. Les sondes de température cutanée et les électrodes pour l'électrocardiogramme sont installées par l'investigateur. La ceinture nécessaire à l'enregistrement de la fréquence cardiaque est installée autour du thorax. Avant d'être connecté aux différents enregistreurs le sujet enfle une paire de chaussettes et le pantalon de la tenue de base. Lorsque les connections sont réalisées, le sujet revêt le reste de la tenue d'intervention, avec les bottes, le casque, l'appareil respiratoire isolant et enfin, il enfle les gants. Le sujet entièrement équipé est pesé, les valeurs sont enregistrées.

L'exercice débute dès que le sujet pénètre dans l'enceinte climatique, dont la température est régulée à $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$ et l'hygrométrie relative à $45 \pm 5\%$. Cette ambiance thermique modérée, sans vent correspond aux conditions climatiques pour Paris (Meteorological Office, 1973).

4.2.1.3. Scénario « laboratoire »

Le scénario à effectuer est représenté par la figure 4.11 :

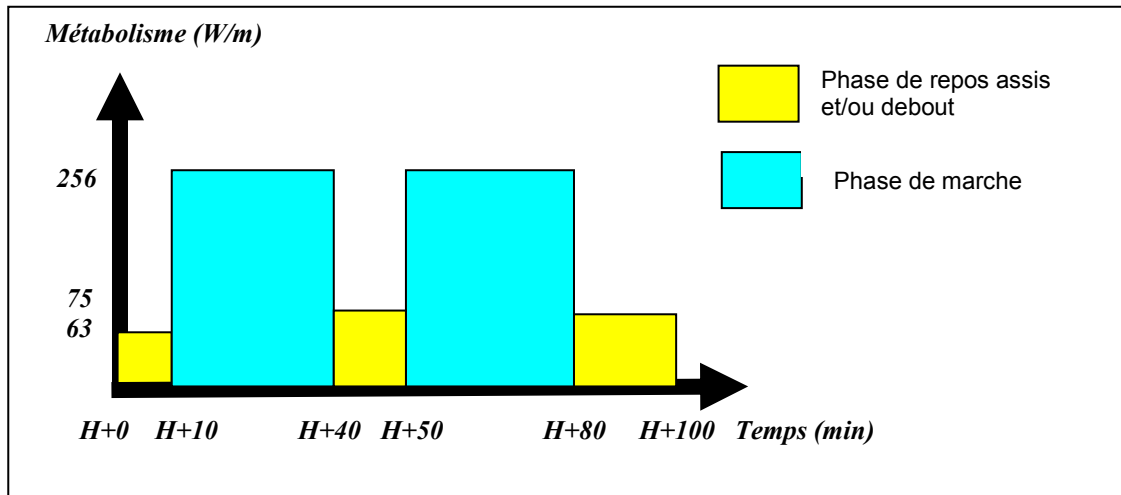


Figure 4.11 : Chronologie du scénario laboratoire

Le sapeur-pompier débute l'exercice en position assise sur une chaise, face à un tapis roulant motorisé.

Les enregistrements des différentes variables débutent à cet instant. Le cardio-fréquencemètre et la centrale de mesure thermique HTM 8000 sont déclenchés, puis les différents paramètres mesurés sont vérifiés.

L'exercice débute (H en minute +0) par une période de repos de dix minutes, durant laquelle le sujet reste assis sur une chaise (cf. Figure 4.12). Une minute avant la mise en route du tapis roulant (H+9), le sujet se lève. La vitesse de rotation du tapis et son inclinaison sont programmées afin que la charge de travail demandée au sujet soit d'environ 256 W/m². Cette programmation qui permet d'estimer le travail métabolique et l'astreinte thermique, intègre les caractéristiques biométriques du sujet, les caractéristiques intrinsèques de l'équipement porté (E1 ou E2Co) et les conditions environnementales (Givoni B. et Goldman R.F, 1971 ; Pandolf et al., 1977).

Durant la marche (cf. Figure 4.13), qui est programmée pour environ trente minutes (H+10 à H+40), la fréquence cardiaque, l'électrocardiogramme et les températures physiologiques sont surveillés en permanence par une télétransmission toutes les minutes et relevés sur le cahier d'expérimentation toutes les dix minutes.

A l'issue de cette phase, le sujet est de nouveau invité à rester debout pendant les dix minutes correspondant à la première phase de récupération (H+40 à H+50).

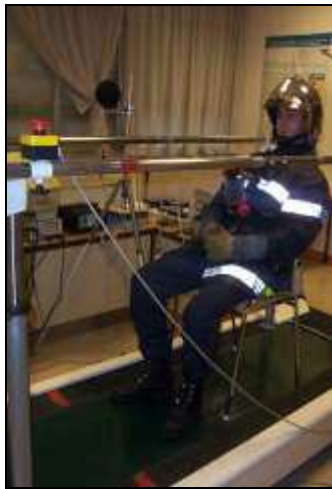


Figure 4.12 : Phase d'attente assise (Photo BSPP)



Figure 4.13 : Phase de marche (Photo DGA/CEB)

Durant cette période, l'ARI est changé pour renouveler le volume d'air disponible. Une deuxième phase de marche d'environ trente minutes est alors réalisée dans les mêmes conditions ; elle est suivie d'une dernière phase de récupération de vingt minutes (H+80 à H+100). A l'issue de ces vingt minutes de repos les enregistrements sont arrêtés et le sujet est pesé à nouveau tout équipé, puis nu.

L'équipement est également pesé afin de connaître la quantité d'eau totale absorbée par les vêtements. Si au cours d'une des deux phases le sifflet d'alarme de fin d'autonomie de l'ARI se déclenche, l'exercice est immédiatement stoppé.

Les critères d'arrêt de l'expérimentation avec les valeurs limites des paramètres physiologiques d'astreinte thermique ont été fixés d'une part, en tenant compte du cadre de vie quotidien et de l'activité opérationnelle journalière du sapeur-pompier de Paris et d'autre part, du dispositif de sécurité (équipe médicale) mis en place pour réaliser les différents tests.

Tout en se référant aux recommandations de la norme relative à l'évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques (AFNOR/ISO 9886, 2004), les seuils d'alerte et de danger des paramètres physiologiques d'astreinte thermique mesurés sont généralement arrêtés en fonction du scénario présentant les contraintes les plus élevées.

Dans le cadre de ces travaux, quel que soit le plateau technique utilisé (laboratoire et maison du feu), les durées limites d'exposition correspondant aux seuils de stockage et de déshydratation, sont identiques à celles intégrées dans les logiciels de simulation numérique (Savourey et al., 2003 ; Warmé-Janville (b), 2003 ; Warmé-Janville et al. (a), 2004).

4.2.2. Résultats des tests

L'objectif de ces premiers essais sur l'Homme était double :

- contrôler le comportement des sujets munis de protections individuelles jusqu'à atteindre un seuil physiologique d'alerte et de danger fixé, ou la limite de l'autonomie de l'appareil respiratoire, c'est-à-dire 1040 litres d'air disponible pour l'ARI bi-bouteille et 2070 litres d'air disponible pour l'ARI mono-bouteille ;
- vérifier l'adéquation des résultats avec ceux de la simulation numérique.

4.2.2.1. Fréquence cardiaque

La figure 4.14 représente l'évolution de la fréquence cardiaque moyenne mesurée sur les sujets lors de l'exercice en laboratoire. Les courbes présentées sont moyennées pour limiter les variations interindividuelles.

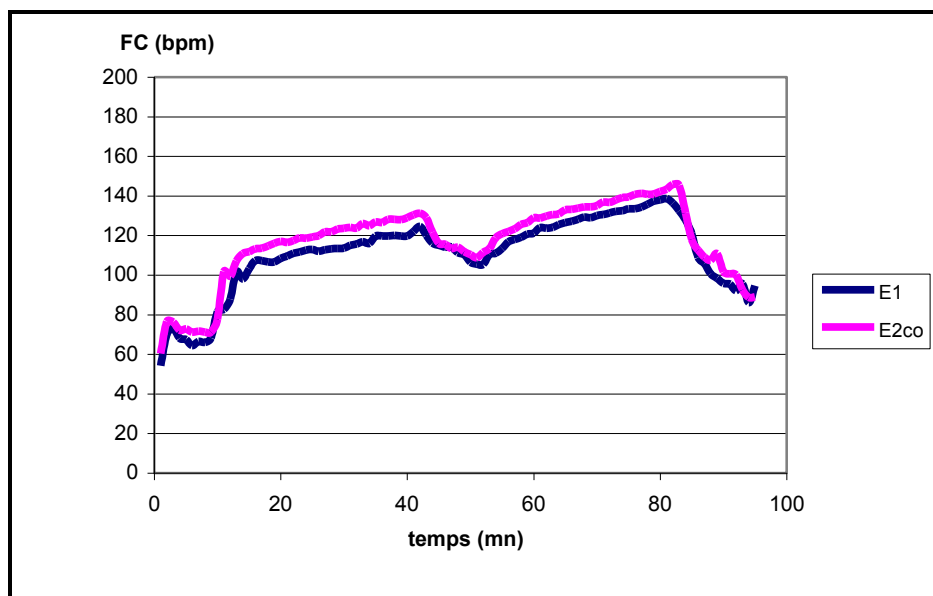


Figure 4.14 : Evolution de la fréquence cardiaque mesurée

Les résultats des exercices réalisés sur le tapis motorisé montrent que l'équipement de protection individuelle entraîne une variation des critères physiologiques chez les sujets mais sans pour autant atteindre l'un des seuils d'alerte et de danger fixés avant la fin de l'autonomie de l'ARI mono-bouteille ou avant la fin de l'exercice.

Les sujets débutent l'exercice en position assise pendant 10 minutes ; la fréquence cardiaque moyenne enregistrée est d'environ 70 bpm. Dès le début de la première séquence de marche, le rythme s'accélère rapidement pour atteindre en deux minutes environ 100 bpm.

Puis, pendant la marche sur le tapis motorisé, la fréquence cardiaque augmente régulièrement jusqu'à atteindre, après 30 minutes, une fréquence moyenne de 121 bpm avec l'équipement E1 et 128 bpm avec l'équipement E2Co. Pendant le repos de 10 minutes en position debout, le rythme cardiaque ralentit de manière similaire pour les deux équipements d'environ 15 bpm. Ce rythme s'accélère à nouveau avec la seconde séquence de marche, pour atteindre après 30 minutes, une fréquence cardiaque moyenne maximale de 139 bpm avec l'équipement E1 et de 145 bpm avec l'équipement E2Co. A la fin de cette séquence, l'appareil respiratoire isolant est déposé et aussitôt le rythme cardiaque chute. Dans les deux configurations de l'essai, et après 15 minutes de récupération en position assise, la fréquence cardiaque moyenne a baissé d'environ 50 bpm.

En conclusion, on observe que cette figure est semblable à celle représentant la simulation avec Protect® de l'évolution de la fréquence cardiaque (cf Figure 4.7).

Cependant, même si les deux tracés sont proches, on constate d'une part, que la contrainte cardiaque est plus élevée pour un sujet portant l'équipement E2Co et d'autre part, que la fréquence maximale atteinte après 80 minutes d'effort, est d'environ 148 battements par minute, ce qui est en-dessous des valeurs issues de la simulation numérique voisines de 170 battements par minute (Warmé-Janville et al. (a), 2004).

La fréquence cardiaque maximale mesurée à la fin de l'exercice pour l'un ou l'autre équipement n'est pas très élevée, elle se situe à environ 80% du seuil d'alerte et de danger. Ce qui confirme que l'entraînement physique effectué quotidiennement par les sapeurs-pompiers est un gage de sécurité.

4.2.2.2. Température du corps

La figure 4.15 représente l'évolution de la température interne moyenne mesurée sur les sujets lors de l'exercice en laboratoire. Les courbes présentées sont moyennées pour limiter les variations inter-individuelles.

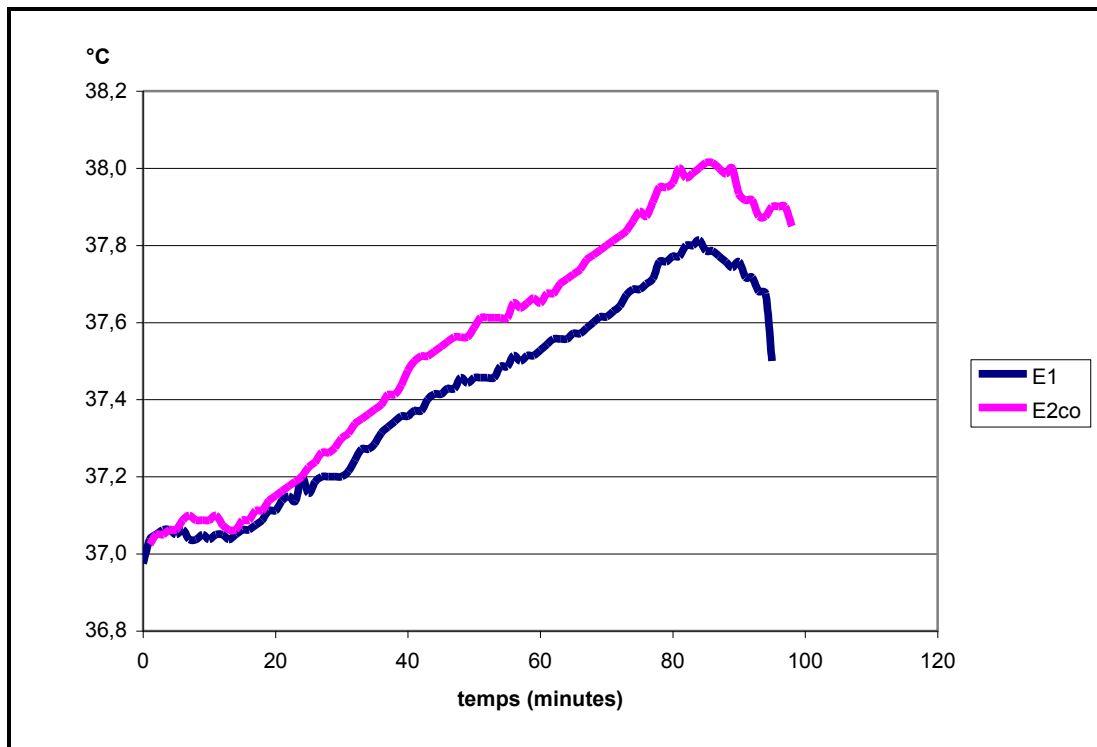


Figure 4.15 : Evolution de la température interne mesurée

On constate sur cette figure que l'élévation de température est moins sévère que celle prédite par la simulation numérique (cf. Figures 4.8 et 4.9). La température maximale atteinte à la fin de l'effort est de 38°C, soit 1,2°C de moins que celle obtenue par les simulations numériques.

De plus, la cinétique de la température interne moyenne n'est pas similaire à la réactivité de la fréquence cardiaque. Les variations n'apparaissent qu'après 18 minutes de tests et les élévations ne sont pas importantes. La température interne moyenne maximale atteinte avec l'équipement E1 est d'environ 37,8°C et celle atteinte avec l'équipement E2Co est d'environ 38°C.

On observe que l'astreinte physiologique d'un pompier est légèrement plus importante lorsqu'il est muni de l'équipement E2Co qu'avec l'équipement E1. En effet, la fréquence cardiaque moyenne, la température centrale moyenne et le stockage moyen, tout en étant très proches,

demeurent supérieurs lorsque le sujet réalise son exercice avec les protections de nouvelle génération, dont la masse est pourtant inférieure d'environ 10 %.

Pour cet exercice en laboratoire, qui s'est déroulé dans une ambiance thermique modérée et sans vent, les variations physiologiques sont essentiellement dues aux mouvements des jambes ; la charge de travail ainsi que les mouvements des membres supérieurs et du tronc étant négligeables. De plus, le port de l'appareil respiratoire isolant porté avec un maintien autour de la taille, a tendance à écraser les couches d'air entre les effets d'habillement, notamment au niveau des épaules et à réduire les mouvements d'air sous la veste d'intervention, contribue à réduire l'efficacité de l'effet de pompage aux seules jambes.

Les écarts –faibles- constatés pourraient donc être liés aux différences de confection des sur-pantalons et de perméabilité à l'air des deux types de tissus utilisés. Les mesures sur des échantillons donnaient une perméabilité à l'air de 150 l/m²/s pour le sur-pantalon de l'équipement E1 et, de 96 l/m²/s pour le sur-pantalon de l'équipement E2Co (Tableau 2.3).

4.2.2.3. Stockage thermique

Bien que n'ayant pas fait l'objet d'une simulation numérique, le stockage thermique a été déterminé lors des essais en laboratoire. Il est classique dans la littérature (AFNOR/ISO 7933, 2005 ; Savourey, 2003) d'utiliser la notion de stockage thermique. Cette variable permet de gommer les éventuelles différences de température existant pour les différents sujets au début de l'expérimentation. Le calcul du stockage thermique est réalisé à partir de la température corporelle moyenne (T_b , en °C).

Celle-ci tient compte, avec des coefficients variables en fonction de l'ambiance, de la température cutanée moyenne (T_{sk} , en °C) et de la température centrale moyenne (T_{re} , en °C).

En ambiance chaude, la température corporelle moyenne (T_b) est égale à :

$$T_b = 0,8 T_{re} + 0,2 T_{sk}$$

A partir de T_b , et connaissant la chaleur spécifique du corps, le poids et la surface corporelle du sujet, on peut calculer le stockage thermique (S).

$$S = c \times P \times (T_{bf} - T_{bi}) / A$$

Avec **S**, le stockage de chaleur en kJ/m² ;
c, la chaleur spécifique du corps (3,47 kJ/kg) ;
P, la masse du sujet en kg ;
A, la surface corporelle du sujet en m².

La figure 4.16 représente une évolution moyenne du stockage thermique pour les deux types d'équipements. Comme la fréquence cardiaque et de la température centrale sont plus élevées pour les sujets munis de l'équipement E2Co, le stockage thermique est également plus important pour le sapeur-pompier porteur de l'équipement E2Co.

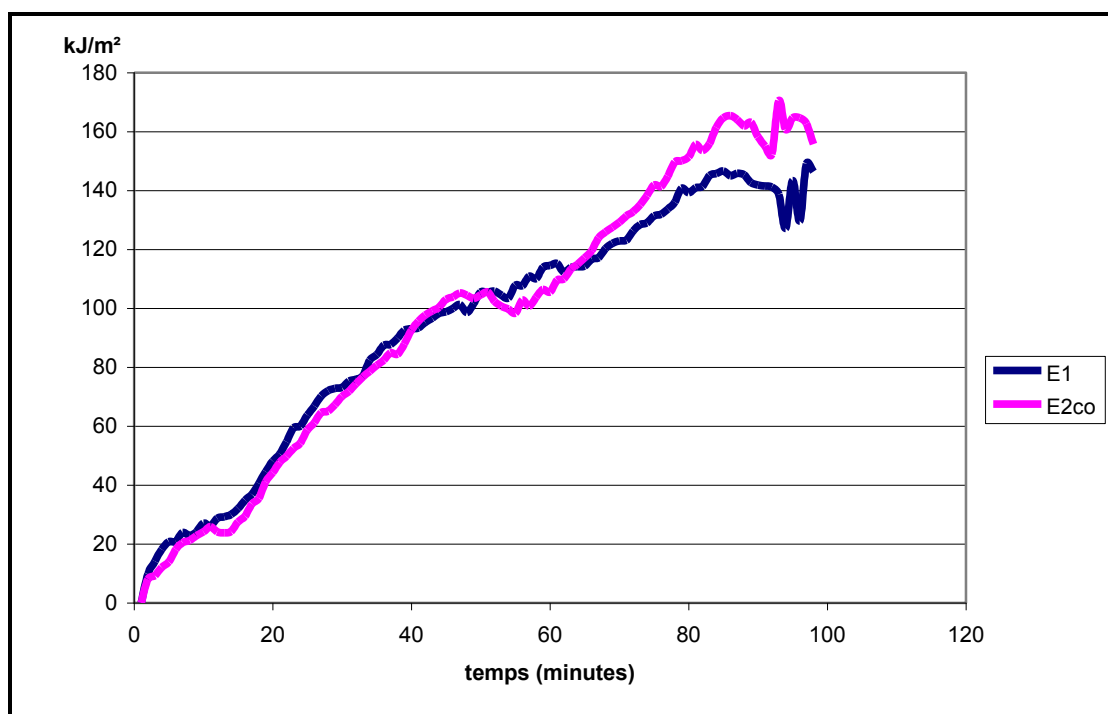


Figure 4.16 : Evolution du stockage thermique moyen

On constate lors de la première séquence de marche une superposition des tracés, ce qui signifie que le stockage thermique est identique pour les deux équipements. Lors de la phase de repos, les courbes semblent marquer un palier, mais avec la reprise de l'exercice le stockage thermique augmente à nouveau. Il est légèrement plus important avec l'équipement E2Co qu'avec l'équipement E1, ce qui est conforme aux constatations effectuées pour les fréquences cardiaques moyennes et les températures centrales moyennes.

Toutefois, les faibles écarts entre les équipements sont dus d'une part, aux caractéristiques d'isolement thermique et la perméabilité à l'air très proches des deux équipements et d'autre part, à l'absence d'un courant d'air ou d'une ventilation forcée dans le laboratoire.

Ce courant d'air ou cette ventilation aurait sans doute amélioré les transferts de sueur à travers les équipements et facilité la thermorégulation.

4.2.2.4. Perte hydrique

Lors de ces tests, les sujets ont été pesés dévêtus et en tenue d'intervention, afin de pouvoir relever la perte hydrique correspondante à l'exercice. Les résultats figurent dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Moyenne des pertes de masses enregistrées

	Equipement E1	Equipement E2Co
Perte de masse (g)	830 +/- 280	980 +/- 330
Sueur dans la tenue (g)	430 +/- 260	570 +/- 270
Sueur évaporée (g)	420 +/- 150	410 +/- 90

La perte pondérale est située entre 600 g et 1090 g pour chacun des sujets à l'exception d'un pompier qui perd 1410 g avec la tenue de l'équipement E1 et 1620 g avec celle de l'équipement E2Co. La perte de poids moyenne des sujets correspondant à la perte hydrique durant l'expérimentation a été de 830 g avec le « veston de peau » avec le sur-pantalon et de 980 g avec l'ensemble textile.

La quantité moyenne de sueur évaporée est de 420 g pour la veste en cuir avec le surpantalon et de 410 g avec l'ensemble textile.

Enfin, la quantité moyenne de sueur piégée dans l'ancienne tenue est de 430 g et de 570 g pour la nouvelle.

On observe ainsi que les écarts de perte de poids et les différences de quantité de sueur évaporée ne sont pas significatifs d'une tenue à l'autre, par contre on relèvera que la tenue textile a tendance à piéger d'avantage la sueur.

Pour ces tests, les sujets portaient la chemise F1 en coton sous la veste d'intervention. Ce vêtement, en dotation à la brigade, qui est hydrophile, favorise l'absorption de la sueur produite lors de l'exercice. Porté à même la peau, ce sous-vêtement constitue une barrière qui limite les transferts thermiques entre la surface cutanée et la phase interne de la veste d'intervention. Les caractéristiques intrinsèques de transfert de ces dernières deviennent de ce fait inactives.

On peut en déduire que lors d'exercices en ambiance thermique modérée, le port d'un sous-vêtement en matière hydrophile réduit considérablement les écarts entre les deux types d'équipements de protection (Jacques, Warmé-Janville et Chelingue, 2007).

4.2.2.5. Synthèse des essais

Concernant, la simulation numérique du scénario laboratoire, les résultats obtenus avec les modèles informatiques en usage au CEB, présentent une évolution des principaux paramètres physiologiques conforme à la réalité. Cependant les valeurs numériques obtenues semblent exagérées par rapport aux tests en laboratoire.

Pour ces derniers, deux types de commentaires peuvent être apportés. D'une part, les résultats de ces tests confortent des travaux réalisés antérieurement. Ainsi, Tack et al., (1984) avaient observé au cours d'exercices réalisés avec des sapeurs-pompiers sur un tapis motorisé, que le poids des équipements portés impliquait une augmentation de la fréquence cardiaque, une augmentation des températures cutanée et rectale et une diminution de la réserve cardiaque. De plus, les variations physiologiques observées sur les sujets étaient différentes selon l'âge de ces derniers.

Manning et Griggs (1983) constatent également lors d'une étude que les pompiers travaillent entre 85 % et 100 % de leur fréquence cardiaque maximale et cela quelles que soient leurs conditions environnementales. Ils affirment que les différences entre les sujets ne se traduisent pas en écart de fréquence cardiaque mais en durée de réalisation de l'exercice.

Lors de tests comparés sur tapis motorisé, réalisés en ambiance chaude et en ambiance froide, avec des pompiers en tenue d'intervention et en tenue de travail sans ARI, Duncan et al., (1979), constatent des différences significatives sur les fréquences cardiaques entre les différentes configurations. Bien que différentes variations de températures cutanées apparaissent après 10 minutes d'effort, notamment en ambiance chaude, les écarts constatés relèvent d'avantage du type de tenue ou d'équipement porté que de la température ambiante.

D'autre part, les tests en laboratoire restent perfectibles, notamment, en effectuant des exercices dont la charge de travail moyenne correspond à celle équivalente à une manœuvre d'extinction. Par ailleurs, pour se rapprocher des conditions d'ambiance thermique d'un feu, il convient d'exécuter les exercices dans un laboratoire où la température ambiante est supérieure à la température cutanée, c'est-à-dire environ 37°C, et dont l'humidité relative est supérieure à 50% comme c'est le cas lors de l'extinction du feu avec

de l'eau. Ces conditions d'ambiance thermique, dans le laboratoire, génèrent alors une contrainte qui ne permet plus l'équilibre du bilan thermique, comme en opération. Pour compenser l'impact de cet environnement, tout en réalisant un effort, il convient que les mouvements sur le tapis motorisé soient réalisés simultanément par les membres inférieurs et supérieurs afin qu'il y ait un effet de pompage et pour permettre le transfert de sueur à travers les couches de vêtements.

La simulation de scénarios avec Prédicтол donne des ordres de grandeurs qui permettent d'adapter les essais sur l'Homme en conditions réelles de feu. La simulation d'exercices simples semble fiable lorsqu'un séquençage objectif de la manœuvre d'incendie est réalisé comme cela a été démontré pour la variante 3, où il apparaît que malgré une phase de repos, le sujet doit se réhydrater et se refroidir s'il veut s'engager une seconde fois.

Les résultats des simulations laissent à penser que le début de la contrainte thermique apparaît entre 20 et 29 minutes (variantes 1 et 2), il convient de le valider lors de tests sur l'Homme à la maison du feu. C'est l'objet du chapitre 5.

Chapitre 5.

Définition des durées d'engagement du sapeur-pompier en conditions réelles de lutte contre l'incendie

-
- 5.1. Protocole expérimental
 - 5.2. Durée d'engagement
 - 5.3. Confirmation de la durée d'engagement et évaluation du confort thermique
-

Lors du scénario « opérationnel » et donc de l'exécution de la manœuvre d'extinction, le sujet est confronté aux conditions environnementales d'un feu. Une première campagne d'essais réalisée avec les équipements E1 et E2Co, a pour but de déterminer pour chacun d'eux, la durée admissible de l'engagement du porte-lance sous protection respiratoire avant qu'il ne subisse une contrainte thermique sévère.

Une seconde campagne d'essais est réalisée dans des conditions identiques, elle a pour but d'évaluer le confort thermique du sujet avec les équipements textiles et leurs évolutions dont certaines sont encore à l'état de prototype (équipements E2 et E3). La durée de l'engagement du porte-lance pour ces essais et celle définie lors de la première campagne.

5.1. Protocole expérimental

5.1.1. Plateaux techniques

5.1.1.1. Description des installations

Les essais en conditions réelles sont réalisés sur deux sites d'entraînement : le site du Fort de la Briche qui est le centre de formation et d'instruction des cadres de la Brigade, à Saint-Denis (93) et celui de la Villeneuve Saint-Georges (94), siège du groupement de formation et d'instruction de la Brigade (cf. Figure 5.1).



Figure 5.1 : Maison du feu de Villeneuve Saint-Georges (Photo BSPP)

Les installations techniques et les organes de commande et de sécurité de ces « maisons du feu » sont identiques. Seule la disposition des caissons de simulation du feu est différente.

L'installation de simulation d'incendie du Fort de la Briche, est divisée en zones comme suit (Figure 5.2):

- SIM 1 : incendie de cuisine, avec simulation d'un embrasement généralisé ;
- SIM 2 : incendie de canapé et incendie d'escalier ;
- SIM 3 : incendie d'un lit à deux niveaux.

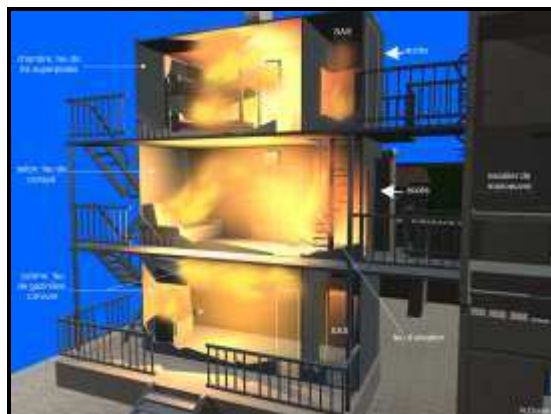


Figure 5.2 : Maison du feu du Fort de la Briche (dessins RD)

Bien que chaque module d'entraînement puisse être utilisé de manière indépendante, certains systèmes et composants sont communs à tous les modules d'entraînement. Les éléments communs incluent la salle de contrôle, l'alimentation en courant et en gaz, le système d'arrêt d'urgence et le dispositif de commande par ordinateur.

L'installation de simulation d'incendie est un système électromécanique, qui à l'aide d'une installation informatisée déclenche des incendies de gaz. Les incendies sont représentés dans des zones domestiques et sont appelés points d'incendie. En fonction du type de point d'incendie, des feux sont déclenchés. Ils couvrent l'ensemble de la zone de l'objet de l'incendie. Etant donné que le combustible utilisé est le gaz naturel, les incendies ne produisent généralement aucune fumée, de la fumée artificielle est ajoutée en guise d'obstacle à la visibilité dans le point d'incendie.

Le matériel typique des points d'incendie comprend une armoire de commande électronique, des unités de réglage de brûleur, des générateurs de fumée, une installation de surveillance du gaz et un dispositif d'aération de combustion. Les systèmes asservis de brûleur et les générateurs de fumée sont dirigés depuis l'armoire des commandes électroniques.

Les systèmes asservis de brûleur régulent les flammes des sites d'incendie et les générateurs de fumée mettent la fumée artificielle à disposition. Les détecteurs de gaz surveillent constamment l'air ambiant des locaux d'exercices afin d'y déceler du gaz non consumé. Les dispositifs d'aération de combustion fournissent l'air nécessaire à la combustion pour le fonctionnement des brûleurs des points d'incendie.

Les pupitres de commande locaux donnent à l'opérateur la possibilité, depuis la zone d'exercice, de démarrer et de terminer le déroulement de l'incendie, ou de placer le point d'incendie en mode pause. Chaque pupitre de commande local est pourvu, en supplément, d'une touche d'arrêt d'urgence, grâce à laquelle, en cas de danger, l'ensemble de l'installation d'exercice peut être arrêté en un instant. Dans le même temps, un système de ventilation garantit un échange d'air rapide dans le local d'exercice. Lorsque certaines valeurs « plafonds » de gaz et de température sont dépassées, l'alimentation en gaz est automatiquement interrompue, le feu s'éteint et la ventilation se met en marche.

5.1.1.2. Ambiances thermiques

Les températures d'allumage dans les différents niveaux de simulateur sont préréglées à partir du tableau de commande. Les températures d'ambiance à chaque étage dépendent de l'action et de l'efficacité du jet de la lance à eau.

La charge radiante mesurée par un globe noir est relevée avec une station micro météorologique ANADATA (Meteorological Office, 1973). Le capteur est situé près de la porte d'accès latérale du simulateur. La valeur relevée correspond sensiblement à la valeur du rayonnement sur l'extérieur de la veste d'intervention au niveau de la poitrine et des bras.

5.1.2. Scénario de manœuvre

Conformément au règlement opérationnel de la brigade (BSPP, 2004) et en application de mesures de sécurité, la manœuvre d'extinction est réalisée en binôme. De ce fait, les sujets réalisent l'exercice en tenant la fonction de « chef d'équipe », puis de « servant » et dans chaque configuration d'équipement. De plus, un repos compensatoire de 48 heures, sans activité opérationnelle, est prévu pour chaque sujet, entre chaque série d'exercice.

Avant de débiter la manœuvre chaque sujet est soumis à un examen médical succinct par une équipe médicale chargée du soutien sanitaire (fréquence cardiaque, tension artérielle). Pendant l'exercice, une sécurité technique, avec une commande d'arrêt d'urgence est assurée par un opérateur spécifique. Après la réalisation des essais, chaque sujet est à nouveau pesé, avant de se réhydrater et de subir un examen médical de contrôle (Figure 5.3).



Figure 5.3 : Pesée après effort, réhydratation, bilan médical final (Photos BSPP)

Le scénario de manœuvre correspond à l'application pratique du scénario opérationnel simulé numériquement (Figure 5.4). On retrouve ainsi, à partir d'un temps T0 (début de la manœuvre) les séquences A, B et C qui constituent l'exercice réalisé par le binôme (Warmé-Janville, 2004 ; Jacques et Cantarel, 2002).



Figure 5.4 : Scénario opérationnel (Dessin RD)

Groupe des séquences A

T 0 : Début de la manœuvre:

Le binôme en tenue de base se rend à l'engin en marchant rapidement sur une distance d'environ cent mètres.

T 90 secondes : Arrivée à l'engin :

Le binôme s'équipe de la tenue d'intervention (cf. Figure 5.5) avant et pendant le trajet dont la durée est de trois cent quatre-vingt-dix secondes (jusqu'à T 480).



Figure 5.5 : Enfilage de l'équipement (Photos BSPP)

T 480 : Arrêt de l'engin.

Chaque pompier enfle l'appareil respiratoire (poids entre 13 et 15 kg selon le modèle) pendant environ soixante secondes (jusqu'à T 540).

Groupe des séquences B

T 540 :

Le binôme part en reconnaissance avec un dévidoir et deux fois deux tuyaux dont un muni d'une lance (Figure 5.6). Le chef d'équipe dispose également d'une commande en sac (poids 1,5 kg) pour éventuellement amarrer les tuyaux. La distance à parcourir entre l'engin-pompe et la cage d'escalier est d'environ soixante mètres. La durée de cette séquence est d'environ cent vingt secondes (poids du tuyau : 3,5 kg ; poids de la lance : 2,5 kg ; poids du dévidoir 50 kg).



Figure 5.6 : Etablissement de manœuvre (Photo BSPP)

T 680 :

Le binôme laisse le dévidoir au pied de l'escalier.

Le servant prend deux tuyaux (poids 7 kg), le chef prend deux tuyaux dont un muni de la lance (poids 9,5 kg).

Le binôme monte une volée de marches (Figure 5.7), puis progresse sur trente mètres pour la reconnaissance du SIM 1 (quinze mètres à l'aller – quinze mètres au retour). La durée de cette séquence est d'environ 45 secondes.



Figure 5.7 : Reconnaissance de SIM 1 (Photo BSPP)

Le binôme monte une deuxième volée de marches (deux fois huit marches) puis progresse sur dix mètres jusqu'à l'entrée du SIM 2. La durée de cette progression est d'environ soixante secondes.

T 740 :

Le binôme établit une lance devant l'entrée du SIM 2.

Chaque équipier déroule deux tuyaux (Figure 5.8). Le servant déroule les tuyaux dans les escaliers jusqu'à l'engin distant de trente mètres. Le servant descend les vingt-six marches en déroulant les deux tuyaux et remonte les marches. La durée de cette manœuvre d'établissement est d'environ cent vingt secondes.



Figure 5.8 : Etablissement de la lance (Photo BSPP)

Groupe des séquences C

T 860 : La lance est en eau.

Le binôme enfile le masque et procède aux mesures de sécurité (Figure 5.9). Les procédures de sécurité avant engagement nécessitent environ vingt secondes.



Figure 5.9 : Mesures de sécurité (à gauche) (Photo BSPP)



Figure 5.10 : Attaque du feu SIM 2 (à droite) (Photo BSPP)

T 880 : Début de l'attaque du foyer (Figure 5.10).

L'extinction du feu débute par l'attaque du foyer SIM 2. A ce niveau, l'extinction sera obtenue au bout de quatre minutes. Le scénario prévoyant que le feu s'était propagé à un volume mitoyen, l'attaque se poursuit après une progression du binôme avec la lance en eau par les escaliers intérieurs vers le SIM 3 (Figures 5.11 et 5.12).

La manœuvre s'arrête lorsque l'un des sujets atteint l'une des valeurs limites des paramètres physiologiques d'astreinte thermique ou le seuil d'alerte de fin d'autonomie de l'appareil respiratoire isolant. Chaque sujet peut également interrompre l'exercice selon sa convenance, en raison d'un inconfort physiologique.



Figure 5.11 : Progression entre SIM 2 et SIM 3 (à gauche) (Photo BSPP)



Figure 5.12 : Attaque du feu SIM 3 (à droite) (Photo BSPP)

Enfin, après la réalisation des essais, chaque sujet a émis un jugement subjectif sur les sensations ressenties avec l'une et l'autre tenue. Ce questionnaire (présenté en Annexe 1), non directif, a abouti à des impressions relatives au confort thermique et à l'aisance au port des différents équipements.

5.1.3. Mesure de l'astreinte thermique

L'astreinte thermique subie par les sapeurs pompiers équipés successivement des différentes tenues pendant l'exercice d'extinction du feu est évaluée au moyen des mêmes grandeurs physiques que celles utilisées lors des tests en laboratoire (fréquence cardiaque, températures cutanées et centrale, perte de masse). Les protocoles et dispositifs de mesures sont identiques à ceux utilisés lors des tests en laboratoire.

5.2. Evaluation des durées d'engagement

Il s'agit d'évaluer l'astreinte thermique pendant l'exercice d'extinction du feu, par des mesures physiologiques, pour différents types d'équipements. L'évolution des paramètres physiologiques et l'atteinte de seuils d'alerte et de dangers doivent permettre d'estimer la durée moyenne d'engagement sous protection respiratoire.

5.2.1. Caractéristiques des essais

5.2.1.1. Les sujets et leur équipement

Les tests sur l'Homme sur le plateau technique « maison du feu » ont été réalisés avec les mêmes sujets que pour les tests conduits en laboratoire.

Ces derniers ont une nouvelle fois été informés des règles applicables dans le cadre de la protection des personnes se prêtant à la recherche biomédicale sans bénéfice individuel direct. La manœuvre opérationnelle a été réalisée avec huit sujets (hommes et femmes) d'un âge moyen de 24 ans et 9 mois dans un environnement réaliste d'une intervention pour feu. Ils portaient les tenues E1 et E2Co.

5.2.1.2. Ambiances thermiques

Pendant les essais, les températures moyennes enregistrées à 0,5 mètre du sol se situaient entre 60°C et 80°C et, à 2 mètres du sol, elles étaient proches de 320°C. Les valeurs maximales observées étaient de 99°C en partie basse du simulateur SIM 3 et de 351°C en partie haute du simulateur SIM 3.

5.2.2. Evolution des paramètres physiologiques

Les enregistrements suite aux essais de l'ensemble des sujets ont été moyennés pour chaque type d'équipement, afin de limiter l'effet des variations interindividuelles.

5.2.2.1. Evolution de la fréquence cardiaque moyenne

La figure 5.13 présente l'évolution moyenne de la fréquence cardiaque pendant les séquences de la manœuvre réalisée à la maison du feu.

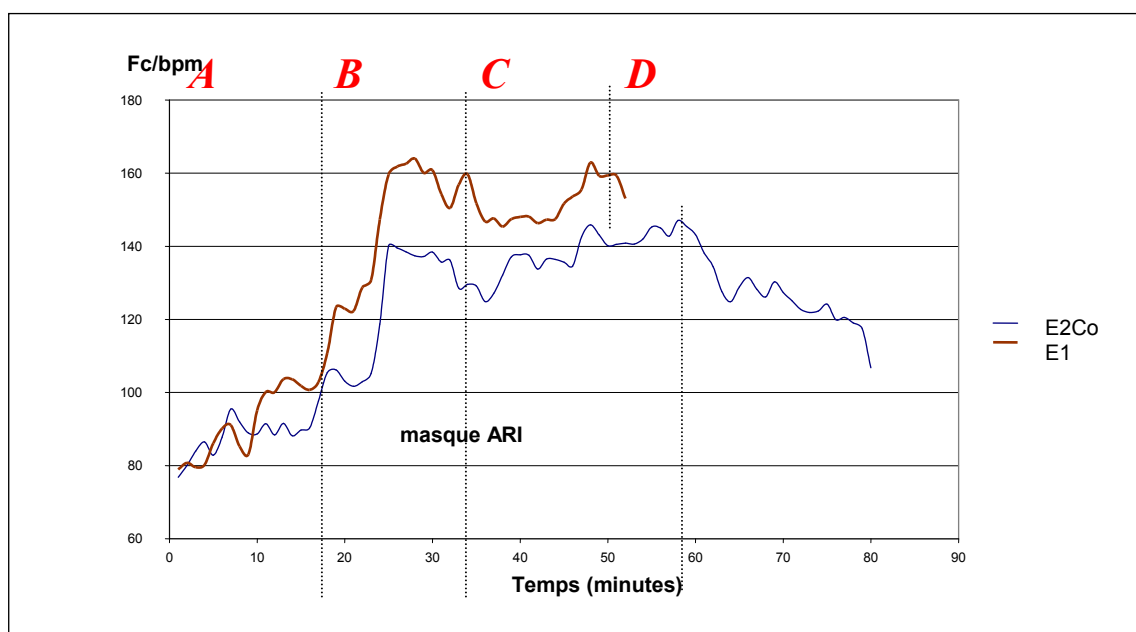


Figure 5.13 : Evolution de la fréquence cardiaque moyenne

Pendant la séquence A, l'effort, qui correspond au déplacement rapide jusqu'à l'engin et à l'enfilage de la tenue d'intervention, reste modéré avec une élévation moyenne de la fréquence cardiaque, par rapport à la fréquence cardiaque de repos, d'environ 25 bpm, quel que soit le type d'équipement.

Dès l'entame du groupe de séquences B, la fréquence cardiaque augmente rapidement mais de manière inégale. Bien que l'exercice demandé soit identique, la contrainte est plus importante pour le pompier muni de l'équipement E1. Lorsque les tuyaux sont établis et la lance en eau, la fréquence cardiaque du sujet muni des anciens équipements a atteint 165 bpm. Avec les protections de nouvelle génération, pour un effort identique, la sollicitation cardiaque est moins importante, avec une fréquence de 145 bpm.

A ce stade de la manœuvre, lorsque l'environnement du feu n'est pas encore ressenti, on peut estimer que l'écart de 10% entre les masses des équipements est à l'origine du surcoût métabolique.

Lors de cette phase de préparation du matériel pour l'extinction, les sujets ont atteint leur fréquence cardiaque maximale sans toutefois dépasser le seuil de danger qui était fixé à 180 bpm. Une analyse individualisée des enregistrements cardiaques, laisse apparaître que les fréquences cardiaques maximales atteintes lors de cette phase sont de 177 bpm et 171 bpm, respectivement avec les anciens puis les nouveaux équipements.

Avec l'application du masque de l'ARI sur le visage, débute le groupe de séquences C. Il s'agit d'entrer dans le volume embrasé et de combattre les flammes avec la lance à eau. Pendant cette opération les déplacements sont courts et généralement en position accroupie ou à genoux. Après l'extinction du feu dans le premier volume, le binôme effectue une progression en hissant l'établissement chargé en eau par un escalier en colimaçon au niveau supérieur afin de poursuivre l'attaque du foyer. La réduction des déplacements et la limitation du travail stabilisent la fréquence cardiaque. Néanmoins en raison de l'environnement atmosphérique, le sujet ne parvient plus à évacuer la chaleur métabolique produite lors des différents efforts. L'équilibre du bilan thermique n'étant plus assuré au-delà d'une certaine durée d'engagement, un stockage thermique s'effectue.

Le groupe de séquences D correspond à une période de récupération qui débute lorsque le sujet sort du volume en feu.

Pendant des exercices similaires réalisés à la maison du feu de Bruchsal en Allemagne (Finteis et al., 2003) la fréquence cardiaque moyenne des pompiers se situait entre 85,8% et 95,4 % de leur fréquence cardiaque maximale, qui était fixée à 220 pulsations moins l'âge du sujet. Par contre, il a été observé que la fréquence cardiaque moyenne des sujets jeunes mais peu habitués au port de l'appareil respiratoire isolant était généralement plus élevée que celle des pompiers certes plus âgés, mais aguerris au port des équipements de protection individuelle. Ces résultats confortent ceux obtenus par Richardson et Capra (2001), Romet et Frim (1987), et Sothmann et al. (1992) lors de travaux de même type. Manning et Griggs (1983) avaient même estimé que l'astreinte cardiaque, pendant une opération d'extinction de feu, se situait entre 90% et 100% de la fréquence cardiaque maximale.

5.2.2.2. Evolution de la température centrale moyenne et du stockage thermique

De même que pour la fréquence cardiaque, la température interne des sujets augmente régulièrement avec la charge thermique (Figure 5.14).

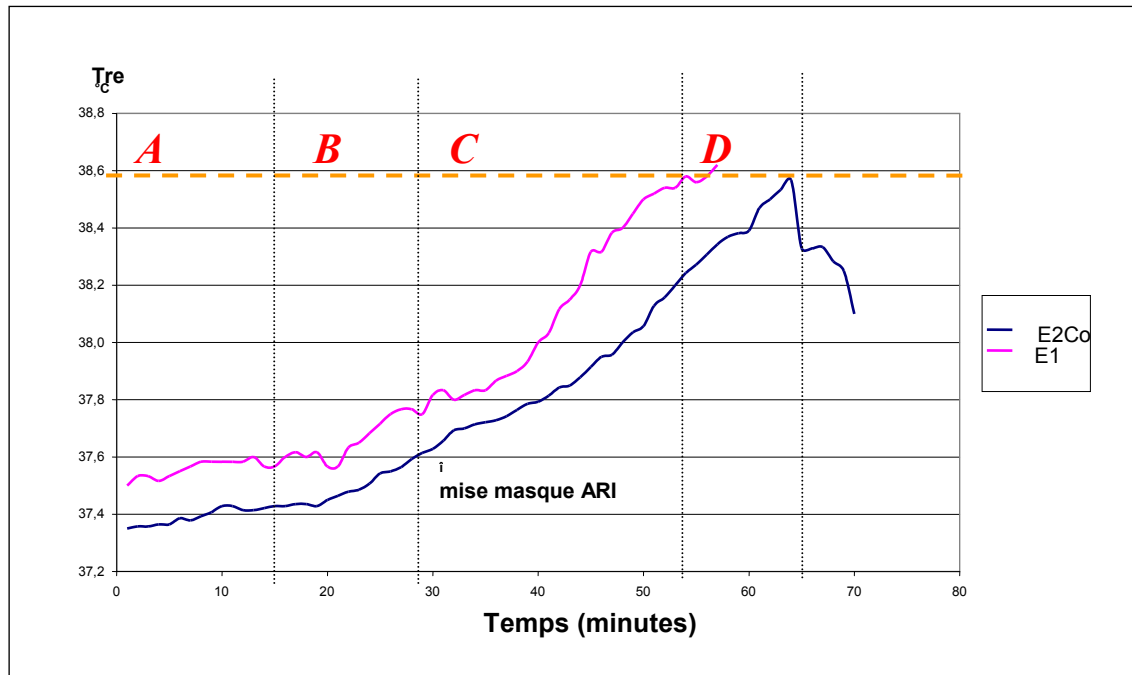


Figure 5.14 : Evolution de la température centrale moyenne mesurée

On observe néanmoins que dès que le porte-lance coiffe le masque de l'ARI (séquence C) la température interne croît plus rapidement avec l'équipement E1 qu'avec l'équipement E2Co. Par rapport à l'observation de la seule température centrale, on constate qu'un sujet vêtu des équipements de nouvelle génération peut intervenir environ 10 minutes de plus qu'un sujet vêtu des anciens avant d'atteindre la limite physiologique, qui a été fixée à 38,5°C.

Si les deux tracés sont parallèles pendant les deux premières phases de la manœuvre ; les élévations de la température corporelle apparaissent environ cinq minutes après le début de la mise en place des tuyaux d'incendie.

La chaleur métabolisme relative à cette séquence est très élevée et lorsque le sujet pénètre dans le volume en feu, l'équilibre du bilan thermique n'est plus assuré, ce qui se traduit par une augmentation de la température interne. Dans cet espace semi- confiné, l'action de l'eau, tout en éteignant le feu augmente l'humidité relative de l'air jusqu'à créer une saturation.

Pendant cette séquence C, l'ambiance extrême à laquelle sont confrontés le porte-lance et son équipier empêche tout transfert de sueur corporelle. La chaleur s'accumule entre les couches des vêtements ce qui entraîne un stockage thermique (Figure 5.15).

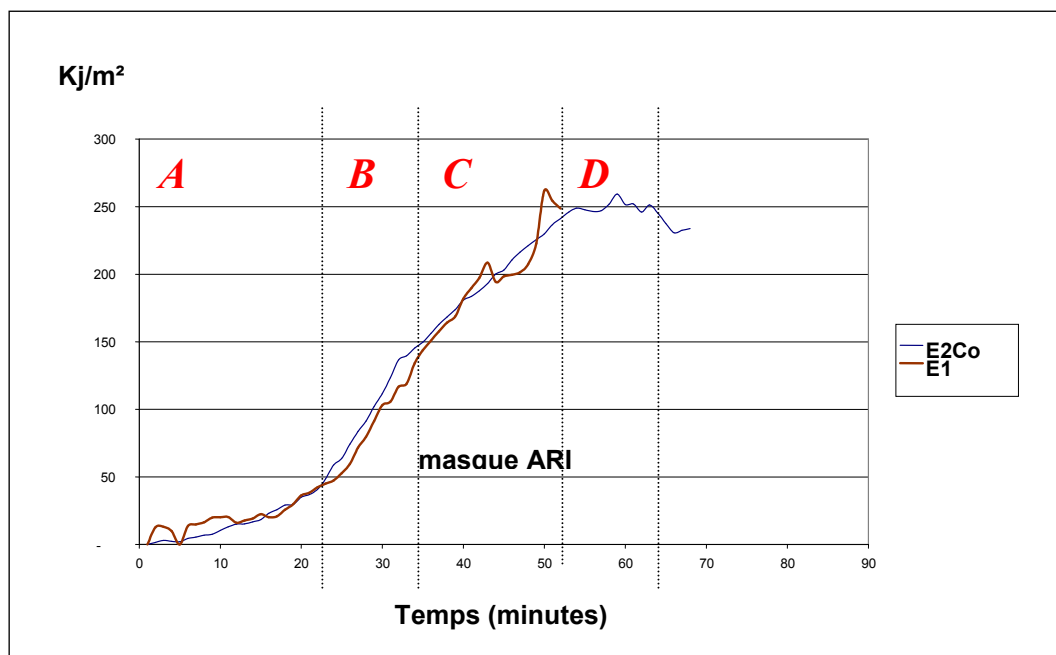


Figure 5.15 : Evolution de la température centrale moyenne mesurée

On constate ainsi, lors des déplacements du porte-lance dans une atmosphère surchauffée avec une température ambiante largement supérieure à celle du sujet et dans un air saturé en humidité (groupe de séquences C), que le rayonnement, la convection et la conduction constituent des gains de chaleur qui viennent s'ajouter à la température corporelle du pompier déjà influencée par la chaleur interne produite par son métabolisme.

Des observations similaires avaient déjà été produites par Smith et al. (2001) dans une étude sur l'analyse des réponses cardiovasculaires et physiologiques de pompiers soumis aux effets du feu. Il avait ainsi été constaté que la température corporelle du pompier correspondait au cumul de la chaleur métabolique produite par le travail musculaire avec la chaleur provenant du rayonnement de la température ambiante. De plus, le port d'un vêtement d'intervention lourd, isolant et non perméable, ajoutait encore une charge supplémentaire au travail métabolique. Dans ces conditions extrêmes, seule l'évaporation sudorale permettait de diminuer la température corporelle, notamment en raison de l'augmentation de la fréquence cardiaque qui allait assurer le maintien de l'équilibre du bilan thermique.

On observe que les résultats de cette manœuvre qui débute par une succession d'efforts dans une ambiance neutre avant de se poursuivre dans un environnement extrême, sont en adéquation avec les grands principes de la thermorégulation humaine cités précédemment.

Dans une atmosphère neutre (Landry et Cholat, 1999), comme lors des séquences A et B ou encore comme lors des tests réalisés au laboratoire, l'être humain dissipe de la chaleur dans l'environnement principalement par la combinaison de transferts secs (rayonnement et convection) et par l'évaporation. Pour faciliter ces échanges, deux systèmes d'effecteurs principaux sont activés et régulés : la vasodilatation cutanée et la transpiration. Tandis que la vasodilatation cutanée produit de faibles élévations de la déperdition thermique sèche, sa fonction première consiste à transférer de la chaleur du noyau à la peau (transfert thermique interne), alors que l'évaporation de la sueur est un moyen extrêmement efficace pour refroidir le sang (transfert thermique externe) avant son retour dans les tissus profonds du corps.

La quantité de chaleur transférée du noyau à la peau est fonction du débit sanguin cutané, du gradient de température entre le noyau et la peau, et de la chaleur spécifique du sang (environ $4\text{kJ/}^{\circ}\text{C}$). Au repos dans un environnement thermique neutre, le débit sanguin cutané est approximativement de 200 à 500 ml/min, soit seulement 5 à 10% du sang total pompé par le cœur. En raison du gradient de 4°C entre la température centrale (environ 37°C) et la température cutanée (environ 33°C), la chaleur métabolique produite par le corps est constamment transmise par convection à la peau pour la dissipation.

Cependant dans les conditions d'hyperthermie importante comme lors du travail très intense à la chaleur (groupe de séquences C), le gradient de température entre le noyau et la peau est plus faible, et le transfert thermique nécessaire s'effectue par une augmentation importante du débit sanguin cutané. C'est alors que la fréquence cardiaque et la température interne agissent ensemble pour maintenir l'équilibre du bilan thermique (Jacques et al. (b) et (e), 2005).

Pendant l'attaque du feu, on distingue sur la figure 5.14 que la température interne du pompier croît beaucoup plus vite avec un équipement E1 qu'avec un équipement E2Co. Environ 18 minutes après avoir coiffé le masque de l'appareil respiratoire isolant, le sujet atteint le seuil de danger fixé. Avec l'équipement de nouvelle génération, la température interne monte plus lentement pour atteindre le seuil de danger entre 25 et 30 minutes.

Ces observations confortent les conclusions d'une étude sur la détermination de l'astreinte physiologique sur des sujets portant une tenue de protection étanche au cours de divers exercices en situation extrême (Chamoux et al., 2005).

Menée sur dix-sept sujets vêtus de tenues de protection face aux risques biologiques, ou contre l'amiante ou encore contre les radioéléments, la recherche a mis en évidence par la mesure d'indicateurs physiologiques comme la fréquence cardiaque et le cortisol salivaire, que les protections portées avec ou sans masque généraient d'une part, essentiellement des astreintes sudorales, cardiaques et psychologiques et d'autre part, que ces astreintes diverses étaient liées entre-elles. Ainsi, la fréquence cardiaque est directement liée à la charge physique de travail, à la charge thermique par une relation avec le stockage thermique de + 30 bpm/degré et à la charge émotive.

Skoelstroem (1987) et Faff et Tutak (1989) avaient observé des résultats similaires lors de leurs travaux sur l'engagement des pompiers munis de protection respiratoire. Ilmarinen et Mäkinen (1992) ainsi que Smith et al. (1997) avaient même démontré qu'au cours d'une manœuvre de lutte contre le feu en conditions de travail extrêmes dues à la chaleur, la température centrale d'un pompier pouvait dépasser 41,4°C. Toutefois, de telles démonstrations relèvent de la recherche médicale qui nécessite une couverture sanitaire médicalisée avec un suivi attentif et prolongé du sujet se prêtant à l'exercice.

5.2.3. Evolution de l'indice de charge physique

Une synthèse de ces paramètres physiologiques a été déterminée et transcrite sous la forme d'un « **indice de contrainte physique** » (Warmé-Janville et al. (b), 2004). Cet indice qui est présenté par la figure 5.16, permet d'estimer la capacité opérationnelle du porte-lance à chaque instant de la manœuvre (Melin et al., 2004 ; Boulard, Warmé-Janville, 2005). Enfin, chaque figure permet également de comparer l'évolution des paramètres physiologiques entre eux pour chaque équipement.

Tout en se référant aux conclusions des travaux similaires et précités, l'analyse des différentes variations physiologiques s'inspire des grands principes de la thermorégulation humaine développés par plusieurs auteurs lors d'études sur l'évaluation de la contrainte thermique dans le cadre des risques professionnels et reprises par Vogt (2001) dans une publication sur « la chaleur et le froid » dans l'encyclopédie de sécurité et de santé au travail.

L'indicateur de charge physique **PSI** permet de quantifier l'intensité d'une situation par rapport aux possibilités d'un individu en tenant compte des limites de sécurité qui ont été fixées précédemment (Warmé-Janville et al. (b), 2004). C'est un indicateur de l'utilisation faite du potentiel opérationnel disponible de chaque sujet. Il combine le coût cardiaque et le coût thermique liés à l'activité qu'il mène.

En définissant les coûts cardiaques (**CCR**) et thermiques (**CTR**)

$$CCR = (F_c - F_{co}) / (F_{c \max} - F_{co})$$

$$CTR = (T_{re} - T_{reo}) / (T_{re \max} - T_{reo})$$

Avec :

F_c, T_{re} : valeur courante (instant t) de la fréquence cardiaque et de la température interne ;

F_{co}, T_{reo} : valeur de début de l'épreuve ;

$F_{c \max}, T_{re \max}$: valeurs maximales admissibles fixées par les seuils de danger (220-âge du sujet ; 38,5°C).

On peut définir l'indice de charge physique PSI par :

$$PSI = (CCR + CTR) / 2$$

Sa valeur est proche de 0% pour un sujet au repos et n'ayant pas exercé d'activité récente, et de 100% lorsque le sujet a utilisé tout son potentiel. On admet qu'à partir de 80%, le sujet entre dans une zone dangereuse, et qu'au-delà de 100%, il encourt un risque d'épuisement ou de coup de chaleur à court terme.

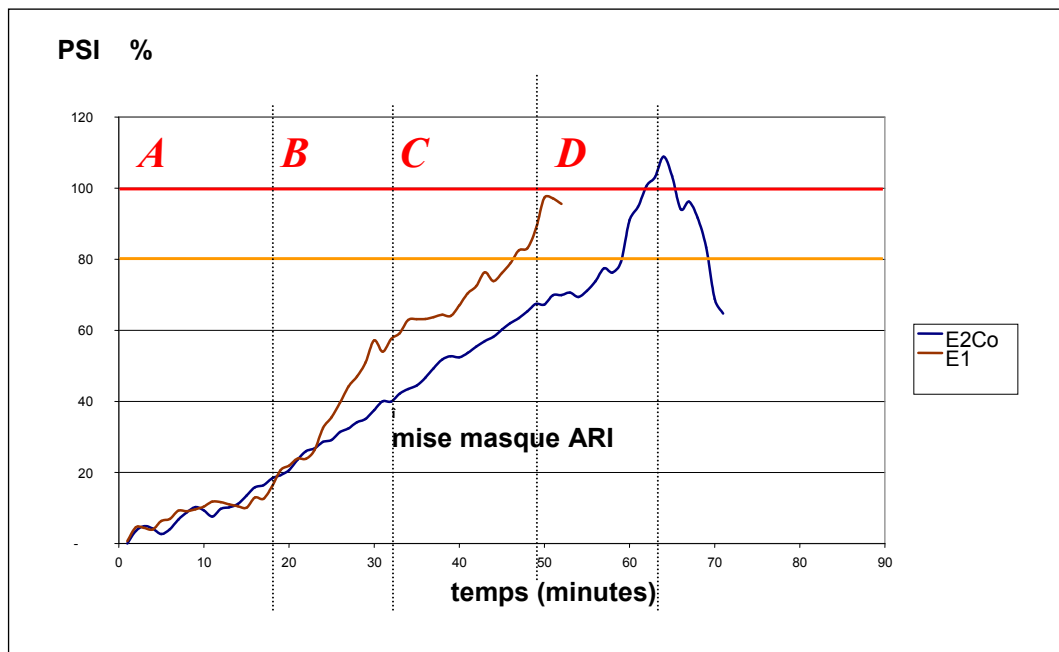


Figure 5.16 : Evolution de l'indice de charge physique

On constate à partir de la figure 5.16 donnant l'évolution de l'indice de charge physique, que pour les deux types d'équipement, et au contraire des écarts faibles qui avaient été observés lors des essais en laboratoire, les dynamiques sont, pour ces tests à la maison du feu, clairement marquées, si bien que les indices de contrainte, associant à parts égales les coûts thermiques et cardiaques relatifs, ne sont plus équivalents pour les deux équipements. Le gain obtenu permet une augmentation significative de la durée de l'attaque du feu avec la nouvelle génération d'équipement. Cependant, cette durée reste notablement inférieure à l'autonomie offerte par le nouvel ARI mono-bouteille.

En utilisant la moyenne des indicateurs de charge physique PSI de l'ensemble des sujets dans une même situation, avec les mêmes équipements d'intervention, il est donc possible de déterminer les durées limites à ne pas dépasser pour chaque équipement.

Comme l'indicateur de charge physique est calculé à partir du début de l'intervention, il tient compte de l'activité réalisée avant de coiffer le masque de l'ARI.

Une évaluation détaillée et comparative de cet indice de contrainte, nous révèle qu'un sujet avec les anciens équipements aura déjà consommé près de 60% de son potentiel physique et psychologique lorsqu'il débute l'attaque du feu (groupe de séquences C) coiffé de son masque d'ARI, alors que le même porte-lance disposera encore de près de 60% de son potentiel avec les équipements de nouvelle génération. Cela confirme également l'écart du coût métabolique occasionné lors de l'établissement des tuyaux et de la lance à eau dans les escaliers. Enfin, les seuils d'alerte et de danger sont atteints au bout d'environ 14 minutes avec l'équipement E1 et 25 minutes avec l'équipement E2Co (Warmé-Janville et al. (b), 2004).

Le tableau 5.1 donne les durées limites qui ont été calculées à partir des valeurs observées sur les sujets au cours de la même intervention sous ARI dans les simulateurs de la maison du feu.

Tableau 5.1 : Durées limites moyennes d'exposition

Durée limite (minutes)	T_{re}	PSI 80%	PSI 100%
Equipement E1	19	14	17
Equipement E2Co	30	25	29

On observe par ailleurs, pour chacun des équipements d'intervention, qu'à partir d'un indice PSI de 80%, apparaît un changement de pente positif manifestant ainsi le dépassement d'une limite de sécurité. Cette limite dépassée est un indice comme quoi la situation entre dans une dynamique dangereuse pouvant mener rapidement au risque de coup de chaleur.

Un temps de 25 à 30 minutes ne doit pas être dépassé pour une intervention sous contrainte thermique importante. Cette durée limite d'exposition est confirmée à la fois par les mesures de température interne et par l'indice de contrainte PSI 100% indiquant que le sujet a utilisé tout son potentiel (Warmé-Janville et al. (b), 2004, Jacques et al. (c) et (d), 2005).

Par ailleurs, les températures cutanées mesurées sont proches des seuils de douleur et de brûlures. Elles atteignent pour l'équipement E1 : 40,0°C sur le bras et 39,7°C sur la poitrine, et pour l'équipement E2Co : 39,4°C sur le thorax et 39,8°C sur le bras (Warmé-Janville et al.(a), 2004).

Les enseignements tirés de ces premiers résultats issus des manœuvres en conditions extrêmes, doivent être replacés dans le contexte opérationnel, c'est-à-dire dans le quotidien du sapeur-pompier de Paris. Ainsi et comme cela a déjà été écrit précédemment, pendant un service de garde, qui peut être de 72 heures d'affilée à la brigade, le sapeur-pompier est très fréquemment confronté à plusieurs opérations de lutte contre le feu et/ou à d'autres opérations éprouvantes et de longues durées. Dans ces conditions de travail, la fatigue s'accumule avec des conséquences directes sur la capacité opérationnelle disponible pour la mission suivante, si la récupération entre les interventions n'est pas totale.

De ce fait, et bien que disposant d'une autonomie théorique proche de 52 minutes, la durée limite d'intervention souhaitable pour l'attaque du feu est de 25 minutes. Si par hasard, un événement imprévu ou accidentel survenait pendant les opérations d'extinction du feu, le porteur-lance disposerait alors encore d'une autonomie disponible de sécurité d'environ 27 minutes en attendant son extraction et son sauvetage par un binôme de sécurité.

5.3. Validation et confirmation des durées d'engagement sous ARI

La validation et la confirmation des estimations de la durée d'engagement sous ARI sont obtenues à l'issue d'une seconde et dernière série de tests sur l'Homme (Warmé-Janville et al., 2007).

5.3.1. Caractéristiques des essais

5.3.1.1. Les sujets et leur équipement

Les sujets sont choisis parmi des sapeurs-pompiers aguerris à l'utilisation des installations techniques de la « maison du feu ». Comme pour les étapes précédentes, les sujets sont informés des règles applicables dans le cadre de la protection des personnes se prêtant à la recherche biomédicale.

Vingt sujets choisis parmi vingt-six volontaires, aptes à servir en compagnie d'incendie, selon les règles en vigueur à la brigade (BSPP, 2004), ont effectué le scénario opérationnel. Les caractéristiques biométriques des vingt sujets figurent dans le tableau 5.2 suivant :

Tableau 5.2 : Caractéristiques biométriques des sujets

Sujets	Age (années)	Taille (m)	Poids (kg)	Surface corporelle (m ²)
1	24	181	77,2	1,97
2	31	180	80,8	2
3	24	170	65,8	1,76
4	24	178	77,7	1,95
5	24	167	68	1,76
6	25	180	77,7	1,97
7	24	178	76,8	1,94
8	24	170	66,4	1,77
9	21	178	68,2	1,85
10	30	168	64,1	1,72
11	24	178	76,9	1,94
12	24	181	77,2	1,97
13	28	175	70,5	1,85
14	24	178	77,6	1,95
15	27	180	73,5	1,92
16	23	185	82,1	2,1
17	28	174	69,8	1,83
18	24	181	74,4	1,94
19	24	167	67,4	1,75
20	25	180	77,8	1,97

- l'âge moyen des sujets est de 25,1 ans avec un écart-type de 2,4 ;
- le poids moyen des sujets est de 73,5 kg avec un écart-type de 5,5 ;
- la taille moyenne des sujets est de 1,76 m avec un écart-type de 0,05 ;
- la surface corporelle moyenne est de 1,90 m² avec un écart-type de 0,10.

Contrairement à la première série de tests à la « maison du feu », pendant laquelle les pompiers avaient une ancienneté de service d'environ 18 mois, les sujets choisis pour cette phase de validation ont une ancienneté de service supérieure à 36 mois, ils sont plus aguerris aux manœuvres sur plateau technique et donc moins confrontés au stress du à l'exercice. De plus ces volontaires qui sont formés aux fonctions de « sapeur servant » ou de « chef d'équipe » ont tous porté et utilisé au moins une fois les équipements de protection de nouvelle génération (E2Co). Par ailleurs, ils sont tous affectés au groupement de formation et d'instruction comme instructeurs à la « maison du feu ».

Enfin, pour cette deuxième série d'essais, les sujets portaient les évolutions de l'équipement E2Co, c'est-à-dire les équipements E2 (avec un « polo F2 » expérimental) et E3 (avec un échantillon de « polo F2 » expérimental et de gants en textile et un sur-pantalon avec une membrane imper-respirante).

En effet, lors de cette série de tests, dont l'objet est la validation des résultats obtenus lors des premiers exercices à la « maison du feu », seuls les ensembles en textiles et l'ARI monobouteille sont portés par le binôme d'attaque. Mais, étant donné que certaines évolutions ont été apportées à ces équipements de nouvelle génération depuis le lancement de l'étude en 2002, les sujets ont porté successivement les équipements E2 et E3. Les évolutions comme le « polo F2 » expérimental, les prototypes de gants en textile et le sur-pantalon multicouches avec une membrane, ont ainsi permis d'estimer le confort thermique apporté par ces effets.

5.3.1.2. Ambiances thermiques

Les températures moyennes enregistrées à 0,5 mètre du sol se situaient entre 60°C et 80°C et, à 2 mètres du sol, sous le plafond, la moyenne se situait à environ 320°C. Les valeurs maximales enregistrées étaient de 83°C en partie basse du simulateur SIM 3 et de 362°C en partie haute du simulateur SIM 3.

5.3.2. Evolution des paramètres physiologiques

Les enregistrements suite aux essais de l'ensemble des sujets ont été moyennés pour chaque type d'équipement, afin de limiter l'effet des variations interindividuelles.

5.3.2.1. Evolution des fréquences cardiaques

La figure 5.17 présente d'une part, l'évolution moyenne de la fréquence cardiaque (courbe bleue) établie à partir de l'ensemble des enregistrements et d'autre part, les fréquences cardiaques extrêmes enregistrées lors du scénario opérationnel.

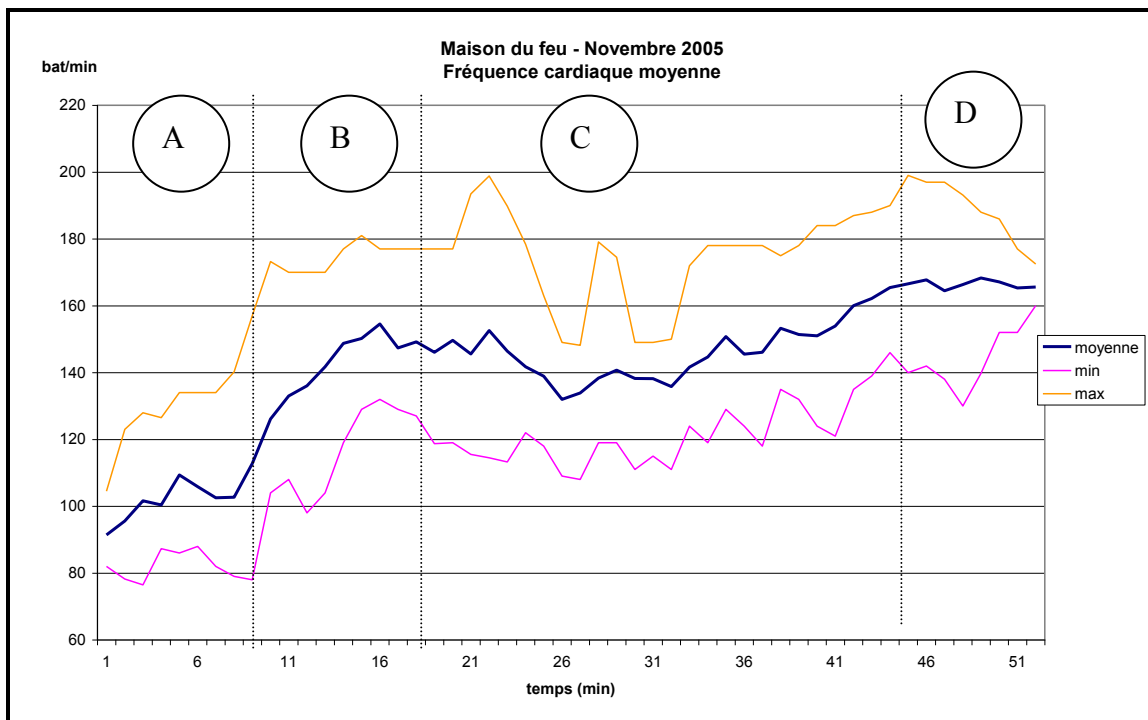


Figure 5.17 : Evolution de la fréquence cardiaque moyenne en fonction du temps

On constate que l'évolution du rythme cardiaque moyen, est similaire à celui enregistré lors des premiers essais à la maison du feu. Il passe de 90 bpm au début de l'exercice à plus de 150 bpm lors de l'établissement de la lance à eau (groupe de séquences B), puis dès que le porte-lance coiffe le masque de son ARI, il se stabilise pendant environ 25 minutes, avant d'augmenter à nouveau pour atteindre 168 bpm en fin du groupe de séquences C.

Pour cette fréquence cardiaque moyenne les seuils d'alerte et de danger ne sont pas atteints, par contre l'attention doit être portée à la courbe jaune qui représente le rythme cardiaque du sujet ayant subi la contrainte la plus importante. En opération, c'est ce sujet qui présente le facteur de risque le plus élevé ; c'est celui qui subit les contraintes physiques et thermiques les plus élevées.

Dès le début du groupe de séquences A, cette fréquence cardiaque croît, en raison du stress généré par l'exercice. L'élévation se poursuit et s'accélère pendant l'établissement des tuyaux dans la cage d'escaliers, pour atteindre, dès l'application du masque de l'ARI sur le visage (début du groupe de séquences C), un pic à 195 bpm. Très rapidement, le sujet atteint un seuil d'alerte et de danger. Pendant l'attaque du feu, comme le pompier limite ses déplacements, la fréquence cardiaque décroît légèrement pour se stabiliser à un rythme d'environ 175 bpm.

Confronté aux contraintes environnementales, avec une hausse des températures cutanées et centrales, le rythme cardiaque du porte-lance s'accélère à nouveau après une vingtaine de minutes d'attaque du feu. Les seuils d'alerte et de danger sont dépassés.

Au cours de ces tests de confirmation, la fréquence cardiaque moyenne est comprise entre 85% et 100% de la fréquence cardiaque théorique, confirmant ainsi les conclusions d'une étude réalisée par Lusa (Lusa et al., 1993) sur la réponse physiologique du pompier pendant un exercice de simulation en ambiance chaude. Il est reconnu que la lutte contre le feu fait partie des activités professionnelles les plus contraignantes car les tâches les plus dures (portage et manœuvre de l'échelle manuelle, tiré de dévidoir, sauvetage d'une personne soumise aux effets directs du feu, établissement d'une lance, etc.) requièrent un niveau physique proche de 97% de la capacité aérobie maximale (Davis et Santa Maria, 1975). Le coût énergétique des tâches les plus contraignantes pour les sapeurs-pompiers représente de 60 à 80% de la capacité aérobie maximale, même en absence de stress émotionnel présents lors d'un incendie (Lemon et Hermiston (a) (b), 1977 ; Romet et Frim, 1987 ; Medelli, et Fullana, 1995 ; Medelli et al. 1996 ; Rancurel, 1998 ; Rumler et Helbig, 2002 ; Siebrecht, 2006 ; Burlaton, 2004 ; Pham et al., 2005).

Le port de la tenue d'intervention avec le casque F1 et l'ARI augmente la dépense d'énergie d'environ 24,7% par rapport à un même effort sans ces équipements (Davis et Santa Maria, 1975). Il réduit de près de 20%, voire plus si on intègre le poids des matériels portés pour l'établissement de la lance à eau, les performances du sapeur-pompier. Tout en observant qu'il était possible de réduire la charge, comme par exemple, avec la mise en service d'une nouvelle génération de protections, ou un gain de poids de 10% a été réalisé, les équipements de protection individuelle diminuent son endurance et gêne considérablement les réponses cardiorespiratoires et la thermorégulation à l'exercice et à la chaleur (Raven et al., 1977).

D'autres travaux sur les contraintes physiologiques liées au port de l'appareil respiratoire isolant à circuit ouvert chez le sapeur-pompier (Torres, 1997) ont mis en évidence que l'influence du poids de la charge sur la dépense d'énergie était significative à partir de 15 kg. Il a été démontré que la résistance à la respiration imposée par l'ARI devenait insupportable pour un travail nécessitant 80% de la VO_2 max (Myhre et al., 1979). Par ailleurs, le harnais de l'ARI est cité comme un important facteur de diminution des capacités respiratoires en limitant les amplitudes du thorax et en diminuant ainsi les échanges gazeux (Louhevaara et al., 1985 ; Nicol-Roy, 1992).

5.3.2.2. Evolution de la température centrale

La figure 5.18 représente l'évolution moyenne de la température centrale (courbe bleue) établie à partir de l'ensemble des enregistrements pour des sujets porteur de l'équipement E2. Les autres courbes sont relatives à des sujets vêtus de deux configurations de l'équipement E3 (DDSC F2¹¹ et DDSC cal¹²).

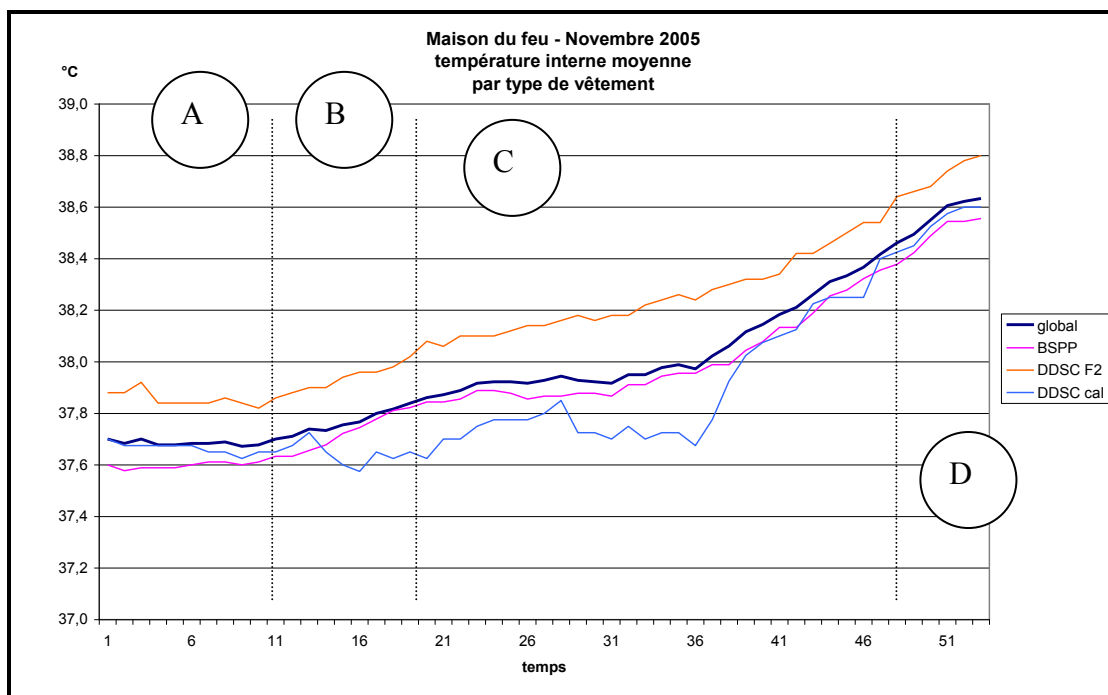


Figure 5.18 : Evolution de la température centrale moyenne en fonction du temps

D'après l'allure des courbes, on note que l'élévation de la température est d'abord liée à la charge de travail et donc la fréquence cardiaque, avant de subir l'influence de l'environnement thermique. On constate ainsi que l'augmentation de la température centrale débute pendant la séquence d'établissement de la lance à eau (groupe de séquences B) lorsque la charge métabolique est élevée. Toutefois, tant que le sujet évolue dans une ambiance thermique neutre et sans avoir coiffé le masque de l'ARI, le bilan thermique reste globalement équilibré. Dès l'attaque du feu (groupe de séquence C), les facteurs environnementaux deviennent défavorables pour le porte-lance. Après environ 17 minutes de lutte contre les flammes,

¹¹ DDSC F2 : Equipement E3 avec sur-pantalon muni d'une membrane imper-respirante et pantalon F1.

¹² DDSC cal. : Équipement E3 avec sur-pantalon muni d'une membrane imper-respirante et caleçon long.

l'équilibre du bilan thermique n'est plus assuré et la température centrale s'élève rapidement. Les seuils de dangers sont atteints au bout de 26 minutes.

Bien que les écarts entre les tracés relatifs aux sujets munis d'un sur-pantalon avec une membrane imper-respirante soient faibles, la configuration DDSC F2 avec le port d'un pantalon F1 sous la tenue d'intervention semble être la plus contraignante. La superposition des couches de vêtements freine considérablement les échanges entre la température centrale et l'environnement extérieur.

5.3.2.3. Evolution de la température cutanée

Lors des essais de confirmation, la température cutanée a été enregistrée au niveau du thorax, du bras, de la cuisse et du mollet. Le capteur de température sur le bras a été positionné à proximité de l'épaule car à cet emplacement les couches d'air entre les vêtements sont écrasées en raison du poids de l'ARI. Les différents enregistrements sont représentés respectivement par les figures 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22.

Les indices globaux, mini et maxi représentent les valeurs moyennes, mini et maxi enregistrées lors du scénario opérationnel.

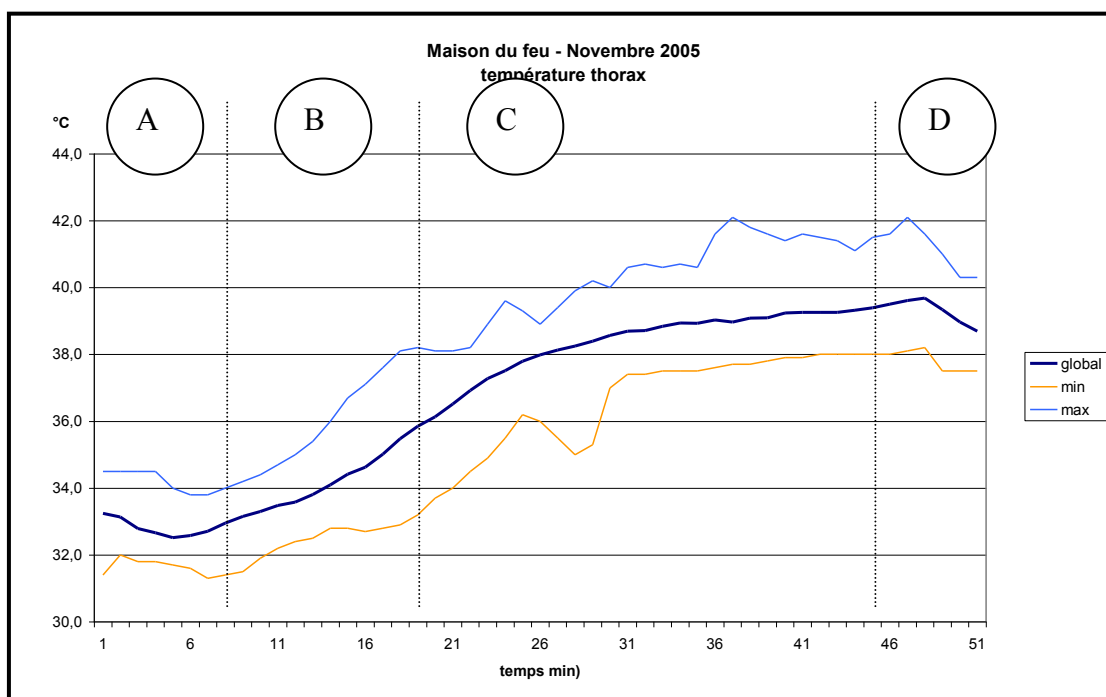


Figure 5.19 : Elévation de la température sur le thorax

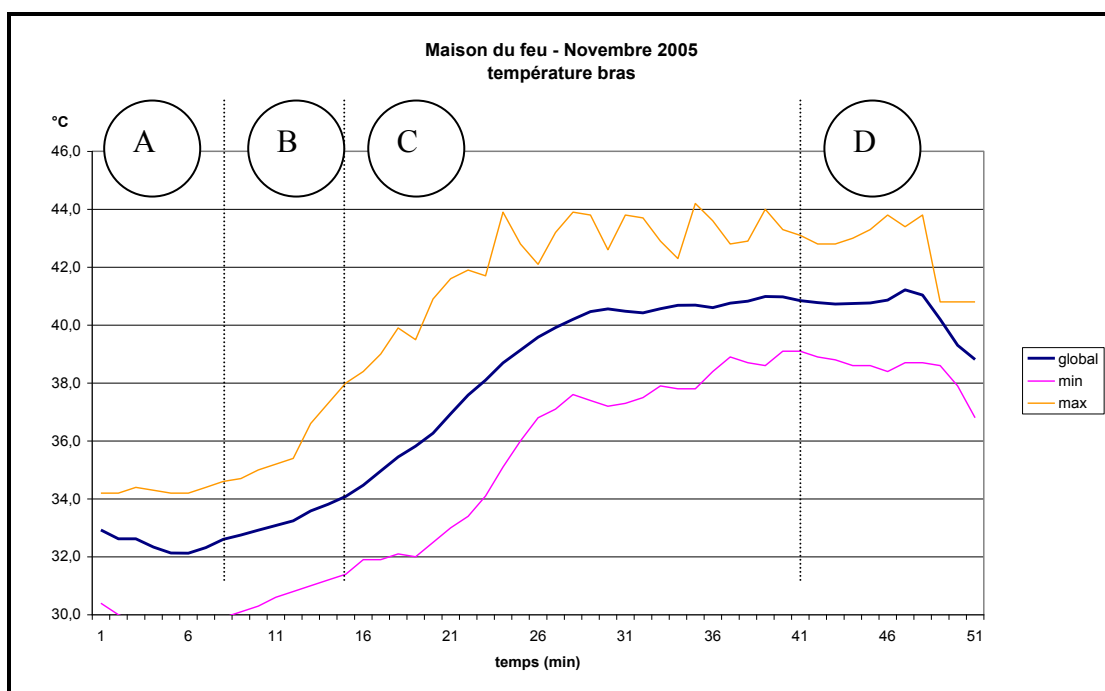


Figure 5.20 : Evolution de la température sur le bras

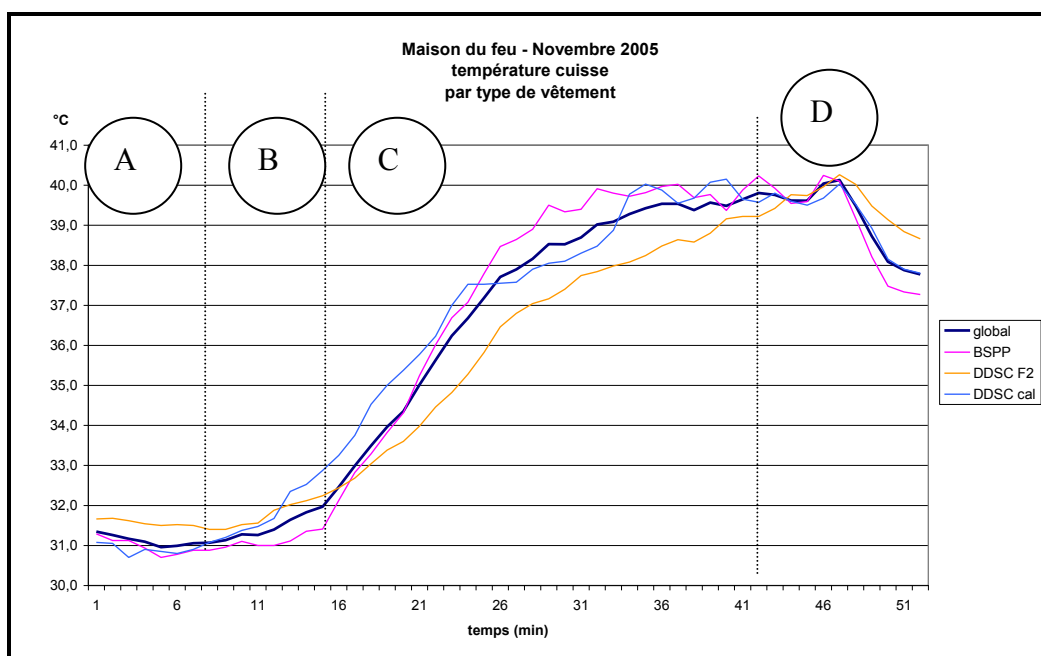


Figure 5.21 : Evolution de la température sur la cuisse

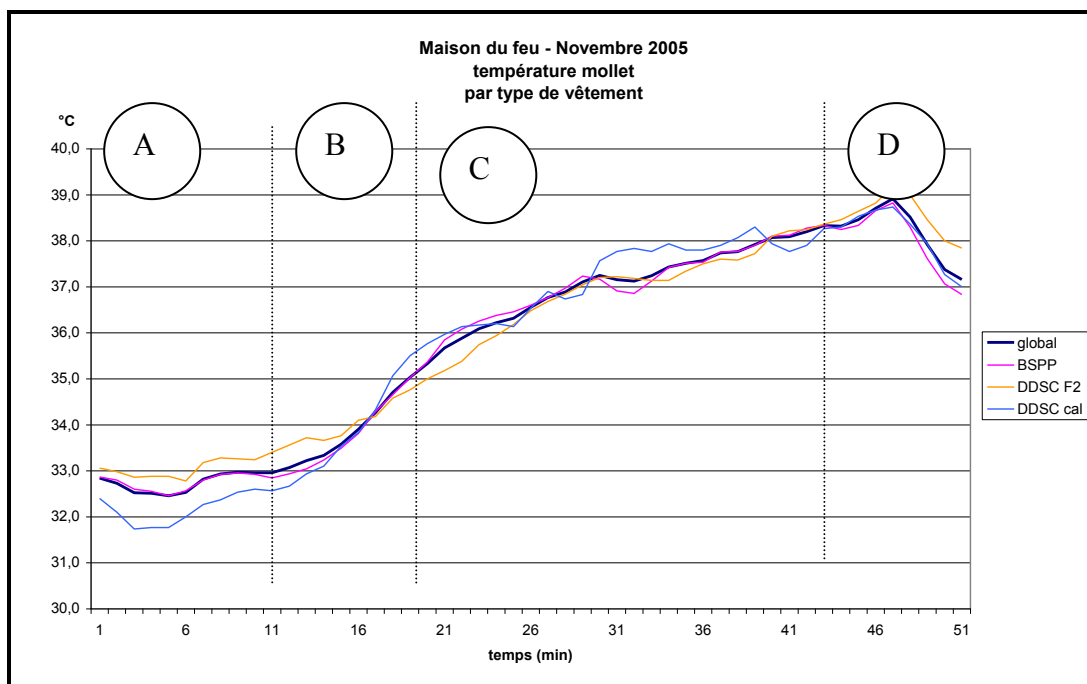


Figure 5.22 : Evolution de la température au niveau du mollet

L'évolution des températures cutanées, prises en quatre points : le thorax, le bras, la cuisse et le mollet, est présentée par quatre figures (Figures 6.22 ; 6.23 ; 6.24 et 6.25). On observe que ces températures reflètent d'une part, l'effet de thermolyse apporté par la sudation et d'autre part, la charge thermique effective malgré la protection offerte par les équipements. Les différentes figures montrent que les températures cutanées moyennes se stabilisent entre 39°C et 40°C, avec cependant des enregistrements de températures maximales beaucoup plus alarmistes atteignant 44°C, le seuil de brûlure du 1^{er} degré. L'analyse se porte donc sur ces températures maximales. La température la plus élevée, qui correspond à une élévation de 10°C, est atteinte sur le bras huit minutes seulement après le début de l'attaque du feu. Cette zone cutanée semble être la plus sensible car l'écrasement des couches d'air entre les vêtements en raison du poids de l'ARI supprime l'isolant naturel.

Le port d'un « polo F2 » expérimental à manches longues, tel que défini au cours de ces travaux, puis adopté par la brigade, serait recommandée afin d'éviter toute possibilité de flamme d'engouffrement en raison de l'absence des gants.

Le tronc et notamment le thorax est la partie du corps, la plus exposée au flux radiant. Ainsi, tout en respectant le devoir du porte-lance (BSPP/BOPE, 2004), c'est-à-dire en adoptant une position accroupie ou à genoux pour l'attaque du feu, des températures voisines de 42°C ont été enregistrées.

Sans atteindre le seuil de brûlure, on constate que les échanges thermiques pour le tronc sont très difficiles. D'autant que la surface d'échange est réduite d'environ 37% par rapport à la surface totale de la veste d'intervention en raison de l'aire recouverte par l'ARI et les différents marquages fluorescents (Chelingue, Jacques (a), 2005).

Comme pour l'ensemble des températures cutanées relevées, la température sur la cuisse augmente très rapidement en phase d'attaque du feu (séquence C). Avec une croissance d'environ 9°C en moins de dix-sept minutes, elle se stabilise à 40°C et cela malgré le port d'un pantalon F1 et d'un sur-pantalon. Encore une fois, la position accroupie du porte-lance influe directement sur la protection offerte par les vêtements. L'adoption de cette position réglementaire, pour ne pas évoluer dans la veine chaude entraîne une traction sur les habits et chasse l'air entre les couches de vêtements, réduisant ainsi l'isolement apporté par la tenue.

L'élévation de température sur le mollet reste progressive, pour passer de 32,5°C en début d'exercice à 39°C après environ vingt-cinq minutes d'attaque du foyer. On observe que la protection thermique offerte par les chaussettes et les bottes en cuir est bonne.

Avec une élévation de plus de 1,5°C pour la température centrale et de plus de 10°C pour la température cutanée, la thermorégulation est un véritable problème chez les sapeurs-pompiers. Ces valeurs confirment néanmoins les résultats enregistrés lors d'exercices effectués dans des bâtiments d'entraînement à la lutte contre le feu en Suisse (Rossi, 2003) où une température moyenne de 48°C a été constatée entre les sous-vêtements des soldats du feu et leur tenue de protection.

5.3.3. Evolution du stockage thermique et de la charge physique

5.3.3.1. Evolution du stockage thermique

La figure 5.23 présente les enregistrements du stockage thermique des 20 sujets tous munis de l'équipement E2. La courbe rouge correspond au stockage thermique moyen.

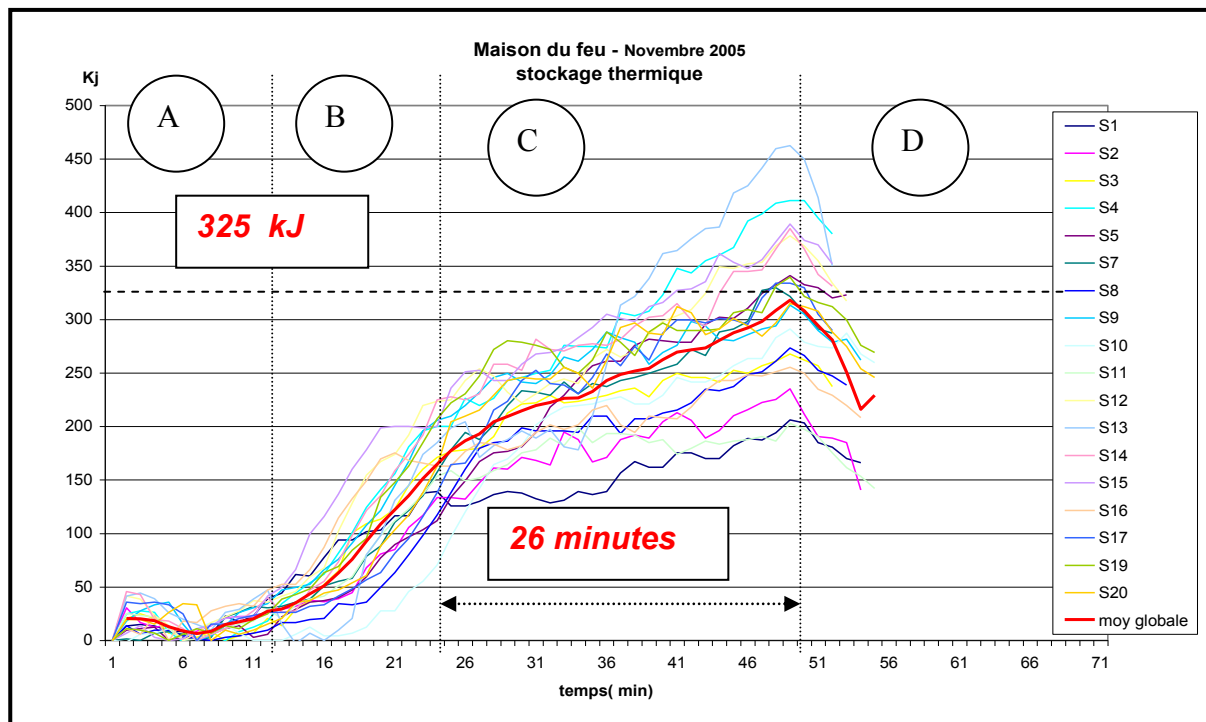


Figure 5.23 : Evolution du stockage thermique

Le tracé moyen (en rouge) confirme que le seuil d'alarme et de danger, fixé à 325 kJ, est atteint après un peu moins de 26 minutes d'attaque du feu. On constate également que le stockage thermique varie beaucoup entre les sujets. Ces variations inter-individuelles confirment que la contrainte thermique est ressentie dès le début du groupe de séquences C, et les risques thermophysiques liés au déséquilibre du bilan thermique apparaissent pour certains sapeurs-pompiers dès vingt minutes d'attaque du feu. Comme le relate Burlaton (Burlaton, 2004), l'acclimatation au travail en ambiance chaude et l'entraînement physique sont deux critères importants qui permettent de retarder les effets de l'effort en conditions extrêmes.

5.3.3.2. L'indice de charge physique

Les indices de charge physique moyen, minimal et maximal sont donnés sur la figure 5.24. Ces indices sont établis à partir des enregistrements des fréquences cardiaques, des températures centrales et cutanées et du stockage thermique.

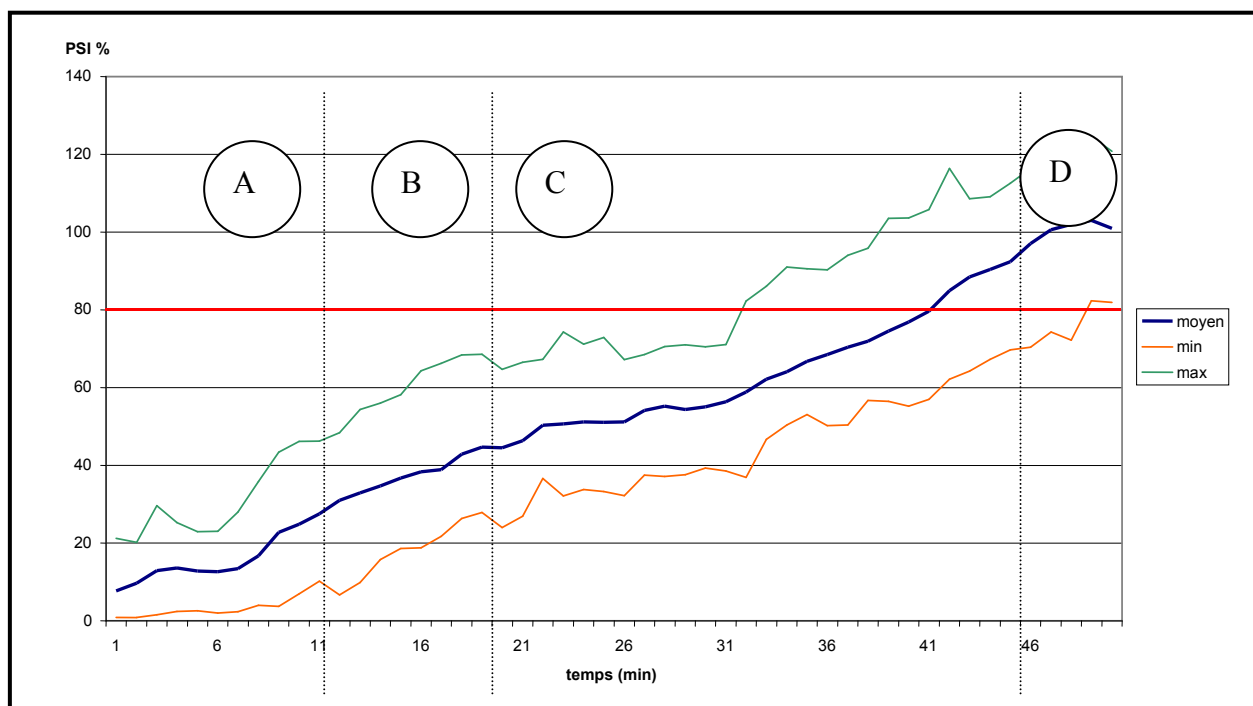


Figure 5.24 : Indice de charge physique

Comme pour la première série de mesures, l'indicateur de charge physique **PSI** a été évalué afin de pouvoir quantifier l'intensité de l'exercice par rapport aux possibilités du porte-lance en tenant compte des limites de sécurité fixées précédemment.

Le tracé bleu, qui correspond à l'indicateur de charge physique moyen présente la même évolution que celui déterminé lors des premiers tests. On observe donc que lorsque le porte-lance débute la manœuvre d'établissement de la lance à eau, il dispose de plus de 75 % de son potentiel physique. Lors de cette séquence (groupe de séquences B), il en consommera environ 20% pour finalement débiter l'attaque du feu avec plus de la moitié de son potentiel opérationnel disponible. Les seuils d'alerte et de danger sont atteints après 28 minutes d'attaque du feu.

Le tracé vert, qui correspond à l'indice de contrainte maximal est plus défavorable pour le porte-lance. Le sujet est rapidement confronté aux effets conjugués de la charge physique et de la charge thermique, il atteint les seuils d'alerte et de danger dès 18 minutes d'attaque du foyer.

Les résultats de cette seconde série d'essais à la maison du feu confirment les différentes valeurs mises en évidence lors des tests de détermination de la durée d'engagement avec les différents équipements de protection.

Ces tests réalisés avec des sujets acclimatés et entraînés aux installations techniques démontrent une nouvelle fois que l'attaque d'un feu par un porte-lance sous protection respiratoire doit être régulée, suivie et structurée. En aucun cas, cette attaque doit être conduite jusqu'aux limites matérielles et techniques de l'ARI, mais être limitée à un engagement de 25 minutes, afin que le sujet garde toutes ses capacités physiologiques et psychiques après une période de récupération et de reconditionnement pour poursuivre son activité opérationnelle qui ne se limite pas à une intervention pour feu pendant sa période de garde (BSPP/BOPE, 2004).

5.4. Synthèse des tests en conditions réelles de lutte contre l'incendie

Dans leurs activités spécifiques de lutte contre le feu, les sapeurs-pompiers sont généralement soumis à des flux thermiques inférieurs à 10 kW/m². Cependant, lors de certaines situations exceptionnelles, ce flux thermique peut dépasser les 40 kW/m² et même atteindre les 80 kW/m² (Rossi, 2003 ; Michaelis, 2003), c'est le cas des explosions de fumées ou des embrasements généralisés éclair. Il a été démontré lors de cette étude que pour ces situations accidentelles, l'ensemble textile qui est caractérisé par un facteur de transmission de chaleur plus faible que le veston de peau, assurait une bien meilleure protection que ce dernier même associé à un surpantalon (Thiriot, 1999).

La protection idéale (Domeneghetti, 1999) aurait une très bonne conduction en cas de flux thermiques faibles, ce qui permettrait aux soldats du feu de se mettre en alerte, et inversement isolerait fortement en cas de chaleurs élevées. Une autre caractéristique importante de l'ensemble textile, bien qu'elle n'ait pas été spécifiquement développée lors de cette recherche, serait une excellente protection contre les agressions mécaniques. De plus, pour répondre aux dernières exigences normatives, l'assemblage des différents morceaux de tissu constituant les vêtements de nouvelle génération, est réalisé avec des fils renforcés par des fibres en para-aramide, du même type que celles utilisées pour la conception de gilets pare-balles. Ces fibres de para-aramide, du fait de leur très haute ténacité, résistent particulièrement aux contraintes d'allongement et de cisaillement. Leur adjonction dans les fils de la veste et du surpantalon augmente par conséquent, la résistance aux coupures (Fiche IFTH, 2005).

S'il est avéré que les développements des fibres (Letourneur, 2004), puis des modes d'assemblage, contribuent beaucoup à l'amélioration du niveau de sécurité, ce dernier reste néanmoins tributaire du comportement du porte-lance, notamment lorsqu'il est soumis au stress thermique (Gout et Floret, 1996). .

Celui-ci intervient lorsque la température centrale du sujet n'est plus régulée. A partir de 39°C (Burlaton, 2004), la vigilance diminue et différents troubles font leur apparition.

Ces troubles systémiques qui peuvent se manifester sous la forme de syncope, d'œdème, de crampes, d'échauffement et de coup de chaleur ou encore de lésions cutanées sont liées à une insuffisance circulatoire, à un déséquilibre en eau et en électrolytique et à l'hyperthermie (Tokuo Ogawa, 2001 ; Loupiac 2001 ; Cholat, 2006), justifiant ainsi le choix des critères physiologiques mesurées lors des tests sur l'homme (Carrera, 1989 ; De Gaudemaris et al., 1998).

L'effort musculaire, l'ambiance thermique, et la propension de la tenue à évacuer la chaleur corporelle sont les facteurs qui contribuent pour l'essentiel au maintien de l'équilibre du bilan thermique. Il a ainsi été observé que le comportement du porte-lance évoluait de manière différemment selon que les caractéristiques intrinsèques de protection des EPI se modifiaient pendant l'extinction du feu ou non. Lors de mesures complémentaires sur les taux d'absorption des deux types de veste d'intervention en service, il a été relevé que la masse d'un « cuir » pouvaient passer de 3.10 kg à 7,40 kg, entre le début et la fin d'une intervention pour feu, alors que dans les mêmes conditions d'intervention, la veste textile augmentait sa masse d'environ 1,32 kg pour atteindre 3.10 kg (Rossi, 1995). Lors de ces mêmes mesures, il a été observé qu'après vingt-quatre heures de séchage (naturel) le cuir présentait encore un surpoids de 1,4 kg alors que la veste en textile n'affichait qu'une masse excédentaire de 0,1 kg (Chelingue et Jacques (b), 2005).

L'influence de l'humidité est double : le volume d'eau alourdit la tenue d'intervention, ce qui occasionne une charge métabolique supérieure nécessaire à l'exécution de l'exercice ; l'humidité modifie les transferts jusqu'à créer un inconfort ou un danger (Rossi et Zimmerli, 1996 ; Rossi, 2001).

Porter la tenue lorsqu'elle est humide ou mouillée, entre deux attaques distinctes, par exemple, ou entre deux interventions, peut dans certains cas, augmenter les risques de brûlures (Rossi et al., 2000 ; Ben Mohamed, 2005), surtout si cette humidité qui est soit due à la transpiration, soit à l'eau d'extinction, accumule trop de chaleur.

Par convection et conduction, cette humidité deviendra brûlante et occasionnera des lésions cutanées ou même épidermiques (Wassermann, 1999). Par contre, lors de certaines occasions, lorsque l'exercice ne dure pas très longtemps et que les flux thermiques sont modestes, l'humidité absorbe les calories, ce qui améliore alors le confort du sujet.

La rapidité de ces échanges à travers les couches reste liée à la confection et à l'assemblage des morceaux de tissu ou de cuir, à son état d'entretien, au temps d'exposition, à la quantité de chaleur transférée, à la quantité de chaleur accumulée.

Avec un veston de peau muni d'une doublure composée d'aramide et de coton, ce phénomène survient plus vite qu'avec une veste en textile à tel point que, lorsque le porte-lance éprouve une sensation de douleur, les délais avant l'apparition des premières brûlures sont très courts. Les caractéristiques intrinsèques du cuir après évaporation de l'humidité naturelle s'altèrent, jusqu'à se rétracter et provoquer de graves brûlures par conduction, comme cela a été présenté précédemment (Rossi et al., 2005 ; Richards et Fiala, 2004 ; Hoschke, 1981).

Aux dires des confectionneurs de vêtements pour sapeurs-pompiers : *« l'évaporation et le transfert de la sueur vers l'extérieur sont facilités avec les tenues d'intervention en textile, notamment celles qui incorporent des membranes imper-respirantes en polyuréthanes, polyester ou polytétrafluoréthylène (proline, Sympatex, Gore-Tex, etc.), car les micropores de ces membranes sont jusqu'à 700 fois plus petites que les particules de vapeur d'eau. De ce fait, les vestes en textiles sont deux ou trois fois plus « respirantes » que celles en cuir ».*

Au cours des différentes étapes de cette recherche, il a été démontré que ces affirmations ne sont vérifiées que dans certaines situations et essentiellement lorsque l'ambiance thermique s'y prête, comme par exemple, lors de tests réalisés dans un but de certification et de conformité à un référentiel normatif européen. De ce fait le strict respect du cadre standardisé n'est pas un gage de sécurité suffisant. Si l'application du référentiel technique garantit une conception avec des caractéristiques sûres, les limites d'emploi et de sécurité, pour un domaine aussi sensible que la lutte contre le feu où à chaque instant le sujet peut se retrouver en danger, ne peuvent être que le fruit d'une validation de mesures et d'essais réalistes et de terrain.

Tout en confirmant les écarts importants entre le veston de peau avec son sur-pantalon et l'ensemble textile, les conditions ne sont que très rarement réunies pendant l'extinction d'un feu pour que le pompier puisse maintenir longtemps son équilibre thermique, quelle que soit la tenue portée (Médaille, 2004). Le stockage thermique étant quasi systématique, car la sueur, essentiel critère d'évaporation de calories, ne diffuse que très peu à travers les équipements notamment lorsque le volume sinistré est saturé en humidité relative de l'air et/ou lorsque le porte-lance se couvre de plusieurs couches de vêtements avec un pull en laine, une veste F1, un tricot de corps en coton, ou un simple « polo F1 » sous sa veste d'intervention en textile.

Par contre, on a noté qu'après l'attaque du feu, lorsque le sujet quittait l'ambiance hostile, la récupération était accélérée. Comme la veste est recouverte d'un produit de déperlance, l'ensemble textile n'a absorbé que très peu d'eau, contrairement au cuir qui a plus que doublé sa masse initiale avec de l'eau d'extinction.

De ce fait, l'écart de poids de 10% initialement constaté est passé à près de 20% (Chelingue, Jacques (b), 2005), modifiant ainsi, les conditions d'engagement dès la deuxième attaque du feu, ou celles de l'intervention suivante.

Conclusion

Cette étude dont l'objet était de définir une méthode pour déterminer les limites d'emploi des équipements de protection de nouvelle génération, aura permis de mettre en évidence que l'attaque du feu est une activité contraignante tant physiologiquement que psychologiquement. L'extinction d'un feu nécessite une parfaite condition physique et demande un entraînement professionnel assidu, car les opérations qui y conduisent relèvent de domaines où le pompier est très souvent confronté à un environnement hostile où les règles habituelles de son confort et de son ergonomie sont perturbées.

L'analyse du cadre d'emploi des sapeurs-pompiers de la capitale aura ainsi permis de mettre en évidence que la lutte contre les incendies qui représente certes, moins de 5% de la sollicitation opérationnelle, constitue le danger le plus grave pour le soldat du feu. Les incendies sont responsables de 10% des blessures et, les brûlures représentent 8% des accidents en intervention. Le travail des équipes médicales de la brigade aura également permis d'identifier la partie supérieure du corps comme étant le siège de plus de 42% des brûlures. Enfin, les décès impliquant un soldat du feu sont très souvent liés à des phénomènes thermiques tels que l'embrasement généralisé éclair, ou l'explosion de fumées ou encore à des événements aux incidences mécaniques ou électriques.

Améliorer la sécurité du soldat du feu avec la réduction des accidents est l'objectif prioritaire de tous les services d'incendie et de secours et, l'élaboration des référentiels techniques européens pour les équipements de sapeurs-pompiers devrait y contribuer. A condition toutefois, de dépasser la vérification des « têtes de série » des matériels y compris les EPI, lors d'essais stéréotypés en laboratoire.

L'enchaînement des essais, avec parfois des adaptations, en fonction des résultats obtenus lors de tests intermédiaires, a montré que la conformité à une norme technique ou de service ne suffisait pas. La démarche de certification réalisée en laboratoire reste sans doute trop théorique et trop éloignée du contexte opérationnel en raison de la complexité de la lutte contre le feu.

De ce fait, la méthode proposée puis appliquée, complète les quelques préconisations qui figurent dans les annexes informatives des nomenclatures techniques et dont certaines n'ont pas pu être vérifiées faute de méthodologie (NF EN 469, version 1995 et version 2005) (Kerry J. Donovan, 2002).

Les difficultés rencontrées pendant la lutte contre le feu, ont été incluses dans une démarche graduelle et maîtrisée des dangers et des paramètres d'ambiance. Tout en assurant le suivi des comportements des sujets, l'emploi comparé des deux types d'équipements aura permis de mesurer leurs évolutions et leurs limites respectives.

L'usage de mannequins instrumentés a dans un premier temps permis de mesurer les caractéristiques intrinsèques des différents équipements, afin d'obtenir des données nécessaires à la simulation numérique d'une manœuvre d'extinction. L'estimation de la charge de travail, puis la détermination d'indices de confort, auront permis de fixer des limites pour les tests sur l'homme. Malheureusement, l'absence de données sur les comportements humains et le nombre important de variables environnementales, lors de ces calculs, les rendent incomplets pour déterminer des limites de sécurité réalistes et fiables. Il s'agit tout au plus d'ordres de grandeurs qui ne peuvent être affinés qu'après des tests sur le terrain.

De ce fait, le contrôle de l'effort et l'enregistrement de critères physiologiques jusqu'à l'atteinte de seuils d'alerte et de danger, en laboratoire, puis à la maison du feu, ont servi à différencier les niveaux de protection apportés par les deux équipements en service à la brigade des sapeurs-pompiers de Paris.

La recherche a démontré que certains effets d'habillement réduisent la thermorégulation du porte-lance. Le polo F1, en coton, est ainsi remplacé par un sous-vêtement hydrophobe et non feu, les gants en cuir qui affichent un taux de rétraction de plus de 20% lorsqu'ils sont soumis à un flash thermique, sont remplacés par des gants en textile.

D'autres constats ont été réalisés :

- si l'ensemble textile offre une meilleure protection thermique que la veste en cuir, dès lors que le flux thermique absorbé par le porte-lance est proche ou supérieur à 5 kW/m^2 , la thermorégulation reste cependant liée à l'humidité relative de l'air. En raison de la charge thermique, les échanges par sudation et par évaporation respiratoire nécessaires pour évacuer la chaleur générée par l'effort physique relatif à la manœuvre d'extinction, perturbent l'équilibre du bilan thermique du soldat du feu.

Par la suite, lorsque le feu est en régression ou même considéré comme éteint, l'humidité relative de l'air est souvent très élevée et parfois supérieure à 80% – en raison de l'emploi de la lance à eau – l'équilibre du bilan thermique n'est pas plus assuré. Un stockage thermique s'accélère, la sueur infiltre les sous-vêtements et s'écoule dans le dos, sans pour autant assurer le refroidissement du pompier ;

- la protection offerte par le veston de peau reste bonne pour des interventions dont les flux thermiques modérés, car l'humidité naturelle du cuir maintient un bon confort au porté (Rossi et al., 2006).

Etant donné que l'activité opérationnelle quotidienne d'un pompier ne se limite pas à une seule intervention ou à un seul incendie, il est fréquent que les caractéristiques intrinsèques des tenues de feu et notamment du veston de peau évoluent et se modifient d'une opération à l'autre.

Il a ainsi, été constaté qu'un « cuir » se gorgeait d'eau pendant l'extinction d'un feu. La doublure en coton s'imprégnait de sueur et la veste d'eau d'extinction. Ce vêtement pouvait ainsi absorber jusqu'à 4 litres d'eau au cours de l'extinction d'un feu, et qu'il lui fallait plus de 24 heures pour reprendre sa masse initiale, alors qu'une veste textile, même si elle absorbe également jusqu'à 2,5 litres d'eau lors d'une extinction, retrouvait 75% sa masse initiale, environ 2 heures après l'intervention.

Enfin, l'ambiance thermique, les caractéristiques intrinsèques, la charge de travail et le niveau d'entraînement avec la condition physique du sujet comme déjà dit, influent directement sur la durée limite d'engagement du porte-lance. Ainsi, les différentes évolutions des EPI de nouvelle génération, permettent à un porte-lance d'attaquer le feu pendant environ 25 minutes sans qu'il soit soumis à des contraintes physiques et thermiques élevées. Cela correspond à une augmentation de l'autonomie de 70% par rapport à celle proposée par l'ARI bi-bouteilles, tout en assurant encore une sécurité de plus de 25 minutes.

Cette étude aura également mis en évidence qu'en raison des grandes variétés de manœuvres opérationnelles et des situations d'attaques du feu uniques, les résultats moyennés restent suffisants. On aura pu constater que face au feu, les comportements humains ne sont jamais les mêmes, chaque sinistre est original, chaque cas est unique.

Non seulement les lieux (dispositions, issues, hauteur, etc.) sont différents, mais les événements (événement déclenchant, intensité, fumée, toxicité...) et les personnes le sont également (âge, nombre, niveau de vigilance, aptitudes physiques et psychiques personnelles...). Il n'y a pas deux situations comparables.

De ce fait, la méthode développée s'est appuyée sur la manœuvre de base du « premier secours », qui est réalisée quotidiennement dans le cadre de la formation professionnelle permanente élémentaire. Néanmoins, même s'il s'agit d'un exercice simple, l'engagement du porte-lance implique l'application de mesures de sécurité.

C'est donc essentiellement la charge de travail nécessaire au sauvetage d'une victime, à l'établissement des moyens d'extinction puis à l'attaque du feu qui conditionne la durée d'engagement sous ARI.

Si l'établissement des lances fait suite à une manœuvre de sauvetage (ou de mise en sécurité) d'une victime par l'échelle à crochets, le porte-lance, selon son état de forme du moment, est susceptible d'atteindre les seuils d'alerte et de danger bien avant 25 minutes d'engagement. Il en est de même si l'extinction d'un feu est réalisée dans la continuité d'un entraînement foncier, qui oblige les sapeurs-pompiers à rejoindre leur engin au sprint, avant de « décaler » et se rendre à l'adresse du sinistre.

La lutte contre le feu reste une activité dangereuse qui nécessite des mesures et des règles de manœuvre. De ce fait, les résultats et la méthode de validation des limites d'emploi des équipements de protection de nouvelle génération ont depuis la fin de l'étude, fait l'objet d'une adaptation du règlement opérationnel de la brigade (BSPP/BOPE, 2005).

Pour les sapeurs-pompiers de Paris, la durée d'engagement du porte-lance à l'attaque du feu en espace clos ou semi confiné, est limitée à 25 minutes. Toutefois, si après cette première attaque le feu n'est pas éteint, un deuxième et dernier engagement est autorisé après une phase de récupération et de remise en condition d'environ 35 minutes. La durée de cette phase de reconditionnement, fait actuellement au sein de la Brigade, l'objet d'une réflexion complémentaire. En tout état de cause, si deuxième engagement, il doit y avoir, il sera systématiquement validé par les moyens médicalisés du soutien sanitaire présent sur les lieux de l'intervention (Savourey et Besnard, 2004).

Enfin, ce travail de recherche devrait permettre d'ouvrir de nouvelles perspectives notamment dans deux domaines : un premier, relatif à l'analyse des conditions environnementales auxquelles est confronté la porte-lance lors d'un incendie, un second, relatif au développement d'un logiciel de simulation de la contrainte thermique spécifiquement adapté à l'exercice de lutte contre le feu.

Depuis leurs lancements, les travaux de validation d'emploi des équipements modernes, ont suscité un vif intérêt de la part des professionnels de la lutte contre le feu et des industriels du textile, très rapidement les nombreux enseignements recueillis au termes des phases intermédiaires ont été intégrés dans différentes étapes d'un programme de recherches dénommé « Proe-Tex » et qui porte sur le développement d'équipement de protection individuelle ou de service, avec des micro-capteurs intégrés. Bien qu'il s'agisse d'orientations nouvelles dans le domaine de la lutte contre le feu, des réflexions similaires ont déjà été initiées à des fins militaires (Vogel, 2002 ; Dittmar, 2005).

La méthode développée pour améliorer la maîtrise du niveau de sécurité, a également été incluse dans les chantiers de travail du « bureau prévention accidents-enquêtes » du Ministère de l'Intérieur, Direction de la Défense et de Sécurité Civiles (Cadiot, 2005 ; Jacques et Chelingue (c), 2006 ; Jacques 2007) afin que dans les mois à venir, sapeurs-pompiers, industriels et chercheurs apportent leurs contributions pour que de manière prospectiviste les tenues du futur (Diry, 2004 ; Ley et Duclos, 2007) du sapeur-pompier soient repensées, en plaçant l'Homme au cœur du dispositif.

Ainsi, et du fait du cadre très réglementé des tests sur l'Homme, notamment en raison des risques encourus lors de l'exécution d'exercices sur un plateau technique du type « maison du feu » où l'environnement thermique peut s'avérer très élevé, la mise au point d'un logiciel de calcul de la contrainte thermique, intégrant les variables que sont les flux thermiques et l'humidité relative s'avère nécessaire. De plus, chaque intervention de lutte contre l'incendie étant différente, le logiciel de simulation devrait permettre d'évaluer les comportements pour de multiples scénarios et variantes et avec différentes caractéristiques de tenues d'intervention.

Bibliographie

Abbadie R – Les accidents du travail chez les sapeurs-pompiers. Editions « France Sélection », 125 pages, 1974.

Agopian P, Carret T, Dufflot J-C, Le Drean J-M, Fabbretti, Rancurel A, Vanuxem P – Normalisation des tenues d'intervention des sapeurs-pompiers. Urgence Pratique, n° 42, 2000.

Andréas J, Rossi R – Thermoregulation of an athlete. Textile d'Utilité Technique n°57, 3rd quarter 2005.

Anderson RA – Fire Gases. In : Curry AS ed. Analytical methods in human toxicology. Part 2, Germany : Verlag Chemie. Weinheim, pp. 289 – 317; 1986

Anselme E – F1 around the world. BSPP/BIRP – ADH n° 427 pp. 8-11; 1986.

Arnaud A – Pompiers de Paris. Edition France sélection ; 1985.

Assmann S – Performance and limitations of aluminised PPE. ALWIT GmbH, Germany. 3rd European Society of Protective Clothing Congress: "Protective clothing for fire-fighters" Gdynia, Poland, 10-12 May 2006

AFNOR, Association française de normalisation – norme française 469, relative aux vêtements de protection pour sapeurs-pompiers, version 1995.

AFNOR, Association française de normalisation - NF EN ISO 9886 – Ergonomie des ambiances thermiques. Evaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques. 22 pages, juillet 2004.

AFNOR, Association française de normalisation - NF EN ISO 8996 – Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination du métabolisme énergétique. 30 pages, février 2005.

AFNOR, Association française de normalisation - NF EN ISO 7933 révisée – Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible. 34 pages ; février 2005.

AFNOR, Association française de normalisation (c) – Ergonomie des postes et lieux de travail : ambiances thermiques. Recueil Normes Hygiène et sécurité, tome 2. Conception des lieux de travail ; pp.143-657 ; mai 2005.

Astrand PO, Rodahl K – Textbook of World physiology, MC Graw Hill 1977 ; Traduction française JR Lacour "Manuel de physiologie de l'exercice musculaire". Ed. Masson, Paris 1980.

Audoin L, Le Goff Y – Troubles urbains en Iles de France – ADH n°641 pp.27-34 ; 2005.

Austin C.C, Dussault G, Ecobichon D.J. (a) – Municipal fire-fighter exposure groups, time spent at fired and use of self-contained breathing apparatus. *Am.J.Ind.Med.*, 40, 683-692; 2001.

Austin C.C, Wang D, Ecobichon D.J, Dussault G (b) – Characterization of volatile organic compounds in smoke at municipal structural fires. *J.Toxicol.Environ.Hlth.Part A*, 63, 437-458; 2001.

Austin C.C, Wang D, Ecobichon D.J, Dussault G (c) – Characterization of volatile organic compounds in smoke at experimental fires. *J.Toxicol.Environ.Hlth. Part A*, 63, 191-206; 2001.

Bader Y, Capt A – European fire fighter clothing trends and technical evolutions. DuPont Personal Protection, Switzerland; 3rd European Society of Protective Clothing Congress: "Protective clothing for fire-fighters" Gdynia, Poland, 10-12 May 2006.

Baud F – Inhalation de fumes. *Urgences Pratique* n°32, janvier 1999.

Baud FJ, Barriot P, Riou B – Toxicité systémique des fumées d'incendies. *J.EUR*, 1: 83-88, 1988.

Barriot P, Riou B – Intoxications par les fumées d'incendie. *In* Intoxications aiguës en réanimation. Paris, Arnette : 169-183 ; 1999

Becker J.F – La puissance d'un feu. *Le Sapeur Pompier Magazine* n°936, pp44-50, juin 2002.

Benedittini H – Les bouteilles d'ARI composites. *Le Sapeur-Pompier* n°851pp 210-214 ; 1994.

Benedittini H – Les appareils respiratoires isolants et la haute pression. *Pratiques Pompiers*, n°29, mai 2006.

Ben Mohamed D – L'appareil respiratoire isolant SPP F1. Les gants de protection pour sapeurs-pompiers ADH n° 561, pp. 60-61 ; août-septembre 1998.

Ben Mohamed D – Brûlé par sa propre sueur ! *Soldats du Feu magazine*, pp. 84-85 n°6, janvier-février 2005.

Ben Mohamed D, Harrault F, Verdy F – L'ARI, un appareil indispensable. *Soldats du Feu magazine* n°20, pp. 53-62, mai juin 2007.

Berneise P (a) – La tenue SPF1 100 % Kermel. *BSPP/HCCA – ADH* n° 435, pp. 4-5 ; 1987.

Berneise P (b) – Du veston de peau, à la veste d'intervention. *BSPP/HCCA – ADH* n°442, pp. 46-47 ; 1987.

Berneise P – Le cuir dans l'habillement des sapeurs-pompiers de Paris. *BSPP/HCCA – ADH* n° 449, pp. 2-6 ; 1988.

Besnard Y, Savourey G, Launay J.C, Hanniquet A.M, Guinet A, Beaumont B, Ullern-Manguin W, Warmé-Janville B – Démonstrateur ECAD et environnement thermique: évaluation thermophysiological en laboratoire. *Rapport technique RT n°37/CRSSA/FH/TP*, janvier 2001.

Birky MM, Clarke FB – Inhalation of toxic products from fire. *Bull NY Acad. Med.*, 57: 997-1013 ; 1981.

Boissard J – Rendons à César...le casque F1, du rêve...à la réalité...10 ans après. *ADH* n°512, pp. 21-25, mars 1994.

Bolstad-Johnson JM, Burgess JL, Crutchfield CD, Storment S, Gerkin R, Wilson JR – Characterization of fire fighter exposures during fire overhaul. *Am. Ind. Hyg. Assoc.*, 61, 636-641, 2000.

Borgé J, Viasnoff N – *Archives des pompiers*. Ed. Trinckvel, pp. 13-53; 1995.

Boulard O, Warmé-Janville B – CAPOPS ou la perte de capacité opérationnelle en ambiance NRBC dans les conditions climatiques éprouvantes. 5^e séminaire du GIE NRBC, Avignon 10-12 mai 2005.

Boutelier C., Loncle M – Conception et réalisation d'un mannequin pour l'évaluation des propriétés thermiques des vêtements. Conférence internationale sur les aspects biophysiques des vêtements de protection. CRSSA – Lyon, juillet 1983.

Brandt-Rauf PW, Fallon LF, Tarantini T, Idema C, Andrewq L – Health hazards of firefighters : exposure assessment. *Br. J. Ind. Med.*, 45, 606-612, 1988.

Bréand A – Les Pompiers de Paris sur des techniques spatiales. Sécurité-Equipement, Revues Aérospatiale, p.145 ; novembre 1997.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris/Bureau études générales – Nouveau casque : essais d'étanchéité. ADH n°396 pp 48-49 ; 1983.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations, « Journal de marche 1977- 2004 », Editions 1977-2004.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations, « Activité opérationnelle, année 1987 », Edition 1988.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations, « Activité opérationnelle, année 1993 », Edition 1994.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations, « Activité opérationnelle, année 2003 », Edition 2004.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations (a), « Activité opérationnelle, année 2004 », Edition 2005.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Règlement sur l'organisation et le fonctionnement du service d'incendie et de secours. ISBN n°2-901945-22-8. Edition Juin 2004.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations (b) – Le traitement de l'appel et le délai de présentation des premiers intervenants. Note permanente n°6-05, novembre 2005.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau études générales (a) – Le cahier des clauses techniques et particulières du SPP F1. ADH n° 540 pp. 43-46, octobre 1996.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau études générales (b) – Mise en place d'appareils respiratoires isolants – SPP F1. Note temporaire n°40561-96, décembre 1996.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau études générales – Mise en service d'appareils respiratoires isolants mono bouteille. Note temporaire n°110099-01, septembre 2001.

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Bureau opérations (b) – Durée de port de l'ARI. Note temporaire n°110235-2006/BOPE/NTMP/D2, janvier 2005.

Brushlinsky NN, Hall JR, Sokolov SV, Wagner P – Center of fire statistics. World fire statistics. Report n°10-2nd édition. Internationale Vereinigung des Feuerwehr und Rettungswesen ; 2005.

Bugat R - Safety of subjects in the biomedical research area. Direction des Centres d'Expertises et d'essais/centre d'études du Bouchet (91) - in conférence of Thermal protection of man under hot and hazardous conditions, Paris march 1999.

Burlaton G – Les brûlures en intervention chez les sapeurs-pompiers de Paris : étude rétrospective (1998-2002). Th. Med. : Lyon n° 96 ; 2004.

Buxton A, Daanen H, Spalding D.B – Development of a virtual manikin. Thermal Protection and Survival Group – Ively Road, Farnborough, TNO Human Factors, Soesterburg (NL), Concentration Heat and Momentum, Wimbledon (GB) – in international conference of Thermal protection of man under hot and hazardous conditions, may 2001 Ljubljana, Slovenia

Cadiot B - Stress thermique et équipements de protection individuelle du sapeur-pompier. Le sous-directeur des sapeurs-pompiers, Ministère de l'Intérieur/DDSC. Lettre DSC 11/Ph.F/n°0505-15, 2005

Candas V – Confort thermique. Centre d'étude de physiologie appliquée à Strasbourg. Technique de l'ingénieur ; BE 9 085-1 à 14 ; Octobre 2000.

Cantarel D – Le drame de la rue du Chevaleret. ADH n° 583 pp. 28-34 ; 2000.

Cantarel D, Stemmelen M – Les vêtements de protection textile de la Brigade. ADH n°594, Août-Septembre 2001.

Cardilès E – Sapeur-pompier de Paris, profession à risques ? L'accidentologie en service des sapeurs-pompiers de Paris. Mémoire de DESS, Institut des Hautes Etudes de la Sécurité Intérieure. BSPP/BEG ; 2003.

Carsin H, Le Bever H – Brûlures graves. In: Samii K, Ed. Anesthésie-réanimation chirurgicale. Paris : Flammarion ; pp.1657-1665, 1995.

Carsin H, Le Gulluche Y, Marotel C, Mion G, Timsit J.F, Guilbaud J – Toxicité pulmonaire des fumées d'incendie. Réanim. Med. Urg Expansion Sci Franç. Paris ; pp 437-457 ; 1990.

Carrera R – Intérêt de la mesure de paramètres physiologiques chez le sapeur-pompier lors du port de l'appareil respiratoire isolant. Thèse Méd., Amiens, 1989.

Cart-Taneur P – Sapeurs-pompiers de Paris, des origines à nos jours. Ed. B.I.P ; 1986.

Centre technique des industries mécaniques (CETIM) – « Analyse de défaillances de bouteilles composites pour appareils respiratoires ». Rapport n°744644/6D1/4a ; 13 pages, avril 2003.

Chamoux A, Boudet G, Hennebaut J.M – Fortes astreintes physiologiques observées au cours du port de tenues de protection étanches en situation extrême. Actes du colloque, 1^{re} Journée d'Information Santé Travail, Hôpital d'Instruction des Armées du Val de Grâce, 21 janvier 2005.

Champoux D, Cloutier E – Problématique de la santé et de la sécurité chez les pompiers : résultats de l'analyse de fichiers d'accidents de deux municipalités du Québec. Rapport IRSST R-144, Montréal, 102 pages, 1996.

Chelingue C, Jacques F (a) – Rapport d'essais de mesure de surface d'échange. BSPP/PV/HCCA n°1-05, 2 pages ; 2005.

Chelingue C, Jacques F (b) – Rapport d'essais de mesures de séchage. BSPP/PV/HCCA n°1-05, 2 pages ; 2005.

Chelingue C, Jacques F (c) – Tests de tenues d'intervention avec Thermo-man^{md} », PV/BSPP/HCCA, décembre 2005.

Chelingue C, Charlot J – L'entretien des tenues non-feu. Conférence JET 2005. Vêtement professionnel n°12 ; Août-Septembre 2005.

Chelingue C (a) – Essais pratiques de performance de cagoules pour sapeurs-pompiers. NVC n°85-06/BSPP/SA/HCCA, 3 pages, avril 2006.

Chelingue C (b) – Fiche descriptive de la chemise d'intervention F2 à manches courtes et à manches longues. BSPP, services administratifs, version n°9, mai 2006.

Cheval E – La tenue de feu du sapeur-pompier de Paris 2005. Soldats du feu magazine, Hors Série n°1, pp. 36-37 ; 2005.

Cholat J.F – Ambiance thermique, climatisation, hydratation et confort de travail. Chef du Service Central d'Appui en Santé au Travail (SCAT) d'EDF/GDF. Site internet : www.centre-evian.com ; 2006.

Code de la santé publique – Loi Huriet-Sérusclat, n° 88-1138 du 20 décembre 1988, relative à la protection des personnes qui se prêtent à des recherches biomédicales. Journal Officiel du 22.12.1888.

Commissariat à l'énergie atomique et GIMAEX – « Programme de Recherche sur l'Optimisation des Moyens Extincteurs pour la Suppression des Incendies en Structures » - Rapport d'essais, 2007.

Comité européen de normalisation (CEN) – EN 469, vêtements de protection pour sapeurs-pompiers ; 1995.

Comité européen de normalisation – EN 443, Helmets for fire-fighters ; 1997.

Cosseron S – L'évolution de la protection des sapeurs-pompiers. Soldats du feu magazine Hors Série, n°3, pp 16-20 ; 2006

Cyon E – Respiration apparatus according to Regnault and Reiset. Atlas zur Methodik der Physiologischen Experimente und Vivisectionen. Giessen, St. Petersburg: Carl Ricker; 1876.

Daveau G – „Réglementation et normes“, Actes du colloque Equipement de protection Individuelle, Réseau Idéal, Rencontre technique, octobre 2006.

Davis PO, Santa Maria DL – Energy cost of wearing firefighting clothing and equipment. International Fire Chief, vol. 41, p. 10-11, 1975.

Decolloreto C – Hommage au caporal Thierry Saganta. BSPP/BIRP, ADH n°617, pp. 8-11 ; 2003

Decloquement J, Bertin F – Sapeurs-pompiers, un siècle de prestige. Ed Ouest-France, 2003.

DéCouflé P, Lloyd JW, Salvin LG – “Mortality by cause among stationary engineers and stationary fireman” J.Occup Med 19: 679-682, 1977.

Délégation Générale pour l'Armement. Le fantassin à équipements et liaisons intégrés (FELIN) – La simulation du combattant du futur – Modèle Informatisé du Combattant, ETBS Bourges, 2000

Denoyelle Y – “Feu d'hôtel, rue de Provence” ADH n° 635, pp. 28-45, mai 2005.

Desbois G – Le cuir une seconde peau. ADH n° 564, p.42, 1998.

Deschamps, S., Momas, I. & Festy, B – Mortality amongst Paris fire-fighters. *Eur. J. Epidemiol.*, 11, 643-646 ; 1995.

Desitter M – Les nouvelles fibres de Rhône-Poulenc. Conférence de presse. Sapeur-Pompier Magazine p. 396-397 ; Lyon, 6 mai 1993.

Deville J – “ Mort au feu ! ” collection Bayard Presse, fiches 29 et 30, 2002.

De Gaudemaris R, Frima T.P, Chamoux A – Mesure de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque en activité professionnelle. Editions Médicales Internationales, Paris, 1998.

De Pampelonne I (a) – Les risques du métier. Le sapeur-pompier magazine, pp. 337-339, 1990.

De Pampelonne I, Schmauch JF, Gravier C (b) – Les risques du métier. Le sapeur-pompier magazine, pp. 377-380, 1990.

De Vogüé A – Tenues d'intervention textile des sapeurs-pompiers : deux méthodes d'entretien pour les tenues de protection. ; Dossier sapeurs-pompiers. Vêtement professionnel, n° 12 Août-Septembre 2005.

Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles – Appareil respiratoire isolant (ARI). Guide national de référence, sous direction des sapeurs-pompiers, bureau de formation et des associations de sécurité civile ; avril 1999.

Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles – Casque de protection de type « F1 » pour les sapeurs-pompiers. Note d'information technique N° 311, DDSC, sous direction des sapeurs-pompiers, bureau des relations industrielles, section des matériels et équipements de sécurité civile ; 2002.

Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles – Explosion de fumées – Embrasement généralisé éclair. Guide national de référence, sous direction des sapeurs-pompiers, bureau de formation et des associations de sécurité civile ; février 2003.

Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles (DDSC) – « Service d'Incendie et de Secours, statistiques 2003 », Ministère de l'Intérieur, Inspection de la DDSC, 2004.

Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles (DDSC) – « Service d'Incendie et de Secours, statistiques 2004 », Ministère de l'Intérieur, Inspection de la DDSC, 2005.

Diry A – Thermorégulation : une « clim » dans les tenues ? Le Sapeur-Pompier magazine n°964, janvier 2004.

Dittmar A – Capteurs, vêtements et habitat intelligents pour la surveillance médicale. Les intermèdes ECRIN, 8 février 2005.

Domeneghetti B – Evolution normative de la veste d'intervention. Le Sapeur-Pompier n°899, pp22-25 ; janvier-février 1999.

Dosne R, Le Goff Y, Aupiais P – Retour sur l'attentat du World Trade Center. ADH n°605 pp 24-41 ; 2002

Dosne R – Au cœur des incendies et interventions. Ed. Hachette Collections, 2004.

Douglas B, Mc Gregor – Risques de tumeurs de la vessie urinaire chez les pompiers, Rapport IRSST R-400, Montréal, 26 pages, 2005.

Douville B – Une nouvelle veste de feu ? Le Sapeur-Pompier, pp 392-395 ; 1993.

Du Bois D, Du Bois EF – Body surface area. European Journal of Applied Physiology, Volume 82, pp. 254-254, Number 3, June, 1916.

Dublin LI, Vane RJ – Occupational mortality experience of insured wage earners. Monthly Labor Review. 64: 1003-1018, 1947.

Duncan HW, Gardner GW, Barnard RJ – Physiological responses of men working in fire fighting equipment in the heat. Ergonomics, vol. 22, n°5, p. 521-527, 1979.

Eaton P, Healy M – The development of a 'female' form manikin as part of a test facility to assess the fire protection afforded by personal protective equipment, Research Report 475 HSE, 45 pages, 2006.

Eliopoulos E, Armstrong B.K, Spickett J.T, Heyworth, F – Mortality of fire fighters in Western Australia. *Br.J.Ind.Med.*, 41, 183-187;1984.

Everett HT – Obligations de résistance à la chaleur des masques d'ARI. Rapport final NIOSH n° 210-76-018; 28 pages, 1976.

Faff J, Tutak T – Physiological responses to working with fire fighting equipment in the heat in relation to subjective fatigue. Ergonomics 32: 629-638, 1989.

Fanger PO – Thermal confort : analysis and applications in environmental engineering. Mc Graw – Hill éd., New – York, p. 244, 1972.

Farnworth B, Dohlan P.A – Heat and Water Transport Through Cotton and Polypropylene Underwear. Textile Research Journal, pp. 627-630, 1985.

Ftaiti F, Duplot JC, Nicol C, Grelot L – Tympanic temperature and heart rate changes in firefighters during treadmills runs performed with different fireproof jackets. Ergonomics, 44, p. 502-512, 2001.

Fein A, Grossmann RF, Jonnes JG, Hoeffel J, MC Day D – Carbon monoxide effect on alveolar epithelial permeability. Chest, 78: 726-31; 1980.

Feuer E, Rosenman K – Mortality in police and firefighters in New Jersey. Am J. Ind Med, 9: 517-527, 1986.

Fiévet P – colonel, chef d'état-major Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – « 14 septembre 2002, Neuilly-sur-Seine... ». ADH N° 614,26-34, juin 2003

Finteis T, Oehler JC, Genzwürker H, Hinkelbein J, Dempfe CE, Becker H, Ellinger K - Stressbelastung von Atemschutzgeräteträgern bei der Einsatzsimulation im Feuerwehr-

Übungshaus Bruchsal. Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg (STAT-Studie) Brandschutz, 57, 367-374, mai 2003.

Filteau M, Shao Y – Evaluation de matériaux utilisés pour la fabrication de gants de pompiers. Rapport R-232, 17 pages ; 1999.

Fortin J.L – Prise en charge du pompier brûlé. ADH n°593, pp.46-48, juillet 2001.

Fortin J.L, Fontaine D, Giocanti JP, Ruttimann M, Kowalski JJ, Lehot H, Loupiac E – Epidemiology of Paris firemen professional burn from January 1998 to march 2001 concerning 55 cases. 9th European Burns Association Congress Lyon, 12-15 september 2001.

Fortin J.L. – médecin-principal, Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Etude sur les brûlures de la face chez les sapeurs-pompiers de Paris. Rapport janvier 2003.

Fortin J.L, Albarello S, Lehot H , Fuilla C, Kowalski JJ – Brûlure du sapeur-pompier en intervention, épidémiologie, prise en charge et réinsertion socio-professionnelle – Expérience de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris . Colloque au centre de recherche du service de santé des armées, La Tronche (38) ; 12-13 octobre 2004.

Fuilla C – Les profils toxicologiques, les accidents collectives, le syndrome du sauveteur. Journée Scientifique, toxico-vigilance des incendies, Paris octobre 1992.

Fuilla C, Rüttimann M, Kowalski JJ – Victimes d'explosion-Prise en charge pré hospitalière. Cycles de conférences 1999-2000. Actes des conférences de réanimation pré hospitalières ; janvier 2000.

Galerie F – Dramatique incendie à Paris XIII^e, ADH n°639, pp. 22-23 ; 2005.

Ganem Y, Meyer J.F, Luzeaux N, Brasseur G, Laborde L, Pomian J.L – Ambiances thermiques : travail en période de fortes chaleurs. Dossier médico-technique, IRNS – Documents pour médecin du travail, n°97, 1^{er} trimestre 2004.

Garnier R, Chataigner D, Efthymiou ML – Toxicité des produits de dégradation thermique des principaux polymères. Données expérimentales. Réanim. Med. Urg. Expansion Sci Franç.: 411-26; 1990

Gay P(a) – L'histoire des appareils respiratoires isolants (d'après des documents de Renault J.), ADH n° 383, pp. 47-48 ; 1982.

Gay P(b) – L'histoire des appareils respiratoires isolants (d'après des documents de Renault J.), ADH n°394, pp. 48-49 ; 1983.

Genin, A – Contribution à l'évaluation des risques professionnels et à leur prévention chez les sapeurs-pompiers de Paris. Thèse sous la direction de Proteau, J., Faculté de Médecine, Université René Descartes, Paris. 149 pages ; 1986.

Gerondal M, Gonin M, Jullien E, Landry B – Etude des conditions d'intervention lors des stages incendie à La Roche Bernard. Rapport 14 pages rédigé à la demande du CHSCT de la centrale nucléaire de Cattenom, 2004.

Giguère D – Contributions possibles de l'ergonomie à l'amélioration de la sécurité du travail des pompiers. Document de réflexion, 1995.

Giguère D, Balleux C, Marchand D – « Aménagement des camions de lutte aux incendie : concordance des contraintes perçues par les pompiers, et observées par les ergonomes, lors de la manutention d'outils et d'équipement », in *Les transformations du travail, enjeux pour l'ergonomie* : Actes du congrès conjoint de l'Association canadienne d'ergonomie et de la Société d'ergonomie de langue française, 3-5 octobre 2001, Montréal, cédérom, vol. 4, pp. 172-176, 2001.

Giguère D, Marchand D – Lombalgies et accidents musculo-squelettiques chez les pompiers : identification et analyse des situations à risque lors de l'accès aux véhicules et de la manipulation d'outils. Rapport R-313, 230 pages; 2002.

Giles G, Staples M, Berry J – Cancer incidence in Melbourne metropolitan fire brigade members, 1980-1989. *Health Rep.*, 5, 33-38; 1993.

Givoni B, Goldman R – Predicting heart rate response to work, environment, and clothing. *Journal of Applied Physiology*, 34, 201-204; 1973.

Goshfeld M, Brooks S, Herzstein M, Schenker M, Jackson R – Fire and pyrolysis products. In *Environmental Medicine*, Mosby Inc. St-Louis. pp. 470-478, 1995.

Griefahn B, Künemund C – Comparative evaluation of different types of self-contained breathing apparatus. Institute for Occupational Physiology, Ardeyst. 67, D-44139, Dortmund, 1999.

Grimes G, Hirsch D, Borgeson D – Risk of death among Honolulu fire fighters. *Hawaii Med.J.*, 50, 82-85 ;1991.

Garrigues S, Bertaut S, Burner P – « Mission : la sécurité du sapeur-pompier ». ADH n° 614, juin 2003.

Guenec A – Le stress chez les sapeurs-pompiers en intervention. Thèse pour doctorat en médecine. Marseille, 1987.

Guerbet M, Jouany JM, Capron R, Dittmar E – Modèles de laboratoire et évaluation des risques en cas d'incendie. RGS n°106, pp.65-69 août-septembre 1991.

Guillaume E – Effets du feu sur les personnes. Synthèse bibliographique. Document Laboratoire National de métrologie et d'essais, 163 pages ; 2006.

Gout D, Floret B – Appareil respiratoire isolant : contrôle du stress à tous les étages... ; Travail et Sécurité n°54, pp. 2-5 ;1996.

Hartzell GE – Advance in combustion toxicology. Technomic Publishing Co Onc. Lancaster, Basel 1989.

Hascoët J, Benner P, Fuilla C – Stratégie médicale face aux feux urbains. Service médical d'urgence de la BSPP, service de santé des armées ; conférence de réanimation pré-hospitalière, cycle 2006-2007, pp. 1-9 ; 2006.

Havenith G, Heus R - A test battery related to ergonomics of protective clothing. *Applied Ergonomics*, n°35 pp 3-20, 2004.

Heidet P – Les nouveaux habits des soldats du feu. Le sapeur-pompier magazine, n° 939 pp. 46-50, 2002.

Hocke M, Schopper-Jochum S, Schubert W – Comparative Evaluation of the Wear Behaviour of Fire Turnout Jackets – Phase II. Séminaire Gore, mai 1999.

Hofmann A, Knaust C, Beard A – Computersimulation von Wohnungsbränden unter Berücksichtigung von Rauchmeldern und brandhemmenden Materialien. 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., pp. 311-338, 2006.

Holmer I – Thermal manikins in research and standards. Proceedings of the 3rd International Meeting on Thermal Manikin Testing, H Nilsson and I Holmer, Eds.; Arbeite och Hälsa, NIWL, Sweden, 1999.

Holmer I – Thermal manikin history and applications. European Journal of Applied Physiology. Medicine and Biomedical and Life Sciences, volume 92, number 6/ September, 2004

Holmer I, Kuklane K, Gao Ch – Thermal stress on firefighters in extreme heat exposure. Lund University, Sweden. 3rd European Society of Protective Clothing Congress : “Protective clothing for fire-fighters” Gdynia, Poland, 10-12 May 2006.

Hoschke B – “Standards and specifications for firefighters clothing” Fire Safety Journal, 4 (2), 125 – 137, 1981.

Hosser D, Dobbernack R – FIRE-TECH “Fire Risk Evaluation to European Cultural Heritage” 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., pp. 619-641, 2006.

Hoschke B – „ Standards and specifications for fire fighters clothing”. Fire Safety Journal, 4 (2) pp.125-137; 1981.

Houeto P, Levillain P, Borron SW, Vicaut E, Baud JF – Rôle des composés organiques volatiles dans la mort pré-hospitalière des victimes d’incendie. Réanim. Urg.; 6. 679, 1997.

Ilmarinen R, Mäkinen H – Heat Strain in Fire-Fighting Drills. Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Ergonomics, Maastricht, The Netherlands, Nov. 2-6, 1992.

Ilmarinen R, Mäkinen H, Lindholm H, Punakallio A, Kervinen H – Thermal strain in fire fighters while wearing task-fitted protective clothing vs. EN 469 protective clothing during a prolonged job-related rescue drill. FIOH, Finland. 3rd European Society of Protective Clothing Congress : “Protective clothing for fire-fighters” Gdynia, Poland, 10-12 May 2006

Institut Français du Textile et de l’Habillement (IFTH) – Tenues de pompiers, changements importants dans la norme 469. Fiche n°56, TUT n°58, 2^e trimestre 2005.

Inzé M.S – Normes, mode d’emploi. Dossier technique : tenues des sapeurs-pompiers, Vêtements professionnels n°1 pp18-24, 2003.

Inzé M.S – Principales normes pour un acheteur de tenues d’intervention. Dossier sapeurs-pompiers, Vêtements professionnels n°12 pp 18-19, 2005.

Inzé M.S – Le sous-vêtement, ultime rempart contre le feu. Technique, produits, Vêtements professionnels n°19, pp 24-26, 2006.

ISO/DIS 13506 – « Protective clothing against heat and flame – Test method for complete garments – Prediction of burns injury using an instrumented manikin »; version mars 2005.

Jacques F – Le sapeur-pompier de Paris face au courant électrique et à ses risques. Mémoire de Diplôme Technique de l'Enseignement Militaire Supérieur Scientifique et Technique ; lieutenant BSPP/BEG, 1989.

Jacques F – La norme technique : de l'approche globale à son application à la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Rapport de DESS « Droit de la Sécurité Civile et des Risques » Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse ; capitaine BSPP/BEG, 1999.

Jacques F (a) – La Brigade de sapeurs-pompiers de Paris au 21^e siècle. Actes du colloque sur l'Actualité de la Sécurité Civile, en Avignon, pp.77-82, avril 2003.

Jacques F (b) – « Le sapeur-pompier, un système d'attaque ». Mémoire de thèse professionnelle – Mastère de sécurité industrielle et environnement, Ecole des Mines d'Alès ; chef de bataillon BSPP/BEG ; 2003.

Jacques F, Warmé-Janville B, Kowalski J.J, Chelingue C – Validation and limits of the new generation of individual protective equipment used by the Paris Fire Brigade. 12^e Congrès national du service de santé et de secours médical, Montpellier, septembre 2004.

Jacques F, Dosne R (a) - La validation des nouveaux EPI, 1^{ère} partie, ADH, n°631, janvier 2005.

Jacques F, Chelingue C, Kowalski J.J (b) – Quelle autonomie avec les nouveaux équipements de protection individuelle. Actes du colloque, 1^{re} Journée d'Information Santé Travail, Hôpital d'Instruction des Armées du Val de Grâce, 21 janvier 2005.

Jacques F, Warmé-Janville B, Chelingue C, Bony-Dandrieux A, Dusserre G, Kowalski J.J, Pelican J.Y (c) – La validation des nouveaux EPI, 2nd partie. ADH, n°632, p. 40-44, février 2005.

Jacques F, Chelingue C, Warmé-Janville B, Kowalski J.J. (d) – Les pompiers de Paris et leurs nouveaux EPI. Textiles à usages techniques, n°55, 1^{er} trimestre 2005.

Jacques F, Warmé-Janville B, Kowalski J.J, Chelingue C, Bony-Dandrieux A, Dusserre G, Dosne R (f) – Equipement de protection individuelle de nouvelle génération : validation et limites d'emploi à la BSPP. In 3 SM mag, Magazine du Service de Santé et de Secours Médical, n°12, mars 2005.

Jacques F, Chelingue C (e) – Wert und Grenzen des Einsatzes persönlicher Schutzausrüstungen der neuen Generation bei der Brigade der parizer Feuerwehr. Interschutz der Rote Hahn, Internationale Messe für Rettung, Brand-/Katastrophenschutz und Sicherheit ; Hannover 6 – 11. Juni 2005.

Jacques F, Chelingue C (g) – Le confort au porté des équipements de protection individuelle de nouvelle génération. Rapport de satisfaction, septembre 2005.

Jacques F, Chelingue C (d) – Sécurité vestimentaire et EPI : vers une sécurité renforcée pour les Sapeurs-Pompiers de Paris. Référence protection des hommes, n°26, le magazine du Syndicat National des Matériels et Articles de Protection, janvier 2006.

Jacques F, Warmé-Janville B, Chelingue C (a) – L'influence du sous-vêtement sur la capacité opérationnelle du sapeur-pompier. Textiles à usages techniques, n°59, pp 32-35, 2006.

Jacques F, Warmé-Janville B, Chelingue C (b) – The influence of underwear on fire fighter's operational capacity. Textiles à usages techniques, n°60, pp 19-20, 2006.

Jacques F – « Gelber Plan » In 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., pp. 167-185. In Salzburg vom 21. bis 25. Mai 2006.

Jacques F, Chelingue C (c) – Evolution des matières utilisées pour les EPI. Actes du colloque « L'équipement de protection individuelle », Rencontre technique du Club des SDIS, octobre 2006.

Jacques F – Validation et limites d'emploi des EPI de nouvelle génération mis en service à la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris. Séminaire « Textiles for Heat Protection » Université Gent, Belgique, février 2007.

Jacques F, Warmé-Janville B, Chelingue C – L'influenza dell'indumento 'sotto-tuta' sulla capacità operativa del vigile del fuoco. Studi scientifici – Codice Rosso. Il mensile Europeo per gli operatori del soccorso tecnico urgente; pp. 54-63, Numero 4 – maggio 2007.

Julien H, Michel A, Bouvart M – Contraintes physiologiques du port de l'appareil respiratoire isolant. ADH, p. 23-25, 1991.

Keiser C, Becker C, Rossi R, Schlapbach L – Analysis of the distribution of sweat in fire fighters' protective clothing layers. Empa, Switzerland. 3rd European Society of Protective Clothing Congress : "Protective clothing for fire-fighters' " Gdynia, Poland, 10-12 May 2006

Kerry J. Donovan – pr EN 469 : 2002. Protective Clothing for Firefighters « Performance requirements for protective clothing for firefighting ». A critical review. Human Vertex Ltd report 2:2004. For and on behalf of: Bristol Uniforms Ltd, February 2002.

Kimura R, Traber LD, Herndon DN, Linares HA, Lubbesmeyer HJ – Increasing duration of smoke exposure induces more severe lung in sheep. J. Appl Physiol 64: 1107-11; 1988.

Kim I.Y – Investigation of air gaps entrapped in protective clothing systems. Fire and Material, n°26 (3), pp. 121-126, 2002.

Kortt U, Schröder H, Dentz U – Belastungsstudie: Atemschutzgeräteträger müssen umdenken. Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg, Brandschutz n°57, 375-380, mai 2003

Kuorinka I, Korhonen O – Firefighters' reaction to alarm, an ECG and heart rate study. Journal of Occupational Medicine, 21-11, 762-766; November 1981.

Landry B, Cholat J.F – Travail en ambiance chaude. Document et logiciel de calcul du temps limite d'exposition par la méthode de sudation requise. Groupe de travail Electricité et Gaz de France, publication SCAST, décembre 1999.

Landry B, Ojalvo J – Détermination de la durée limite d'exposition au travail en ambiance chaude par le calcul de la sudation requise selon la norme NF EN 12515. Groupe de travail Electricité et Gaz de France, publication SCAST révisée, décembre 1999.

Lavillunière N – Service médical de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris La gestion du stress post-traumatique chez les sapeurs-pompiers de Paris. Actes du colloque EDF-GDF/BSPP, mars 2007.

Lebars B – « Eric Vauthier, pompier de Paris », Editions X. Barral, 2004.

Le Blanc PR, Fahy RF « 2001 Firefighter fatalities » NFPA Journal, vol. 96 n° 4; 68-76 July/August 2002.

Le Gall E, Michel A – Le stress et la profession de sapeur-pompier. Mémoire de DESS « physiologie chimique et physiopathologie » Paris VII avec le service de santé de la BSPP. ADH n° 553, pp. 21-25, décembre 1997.

Lehot H, Desportes JC, Ruttimann M, Michel A – Service médical de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris Epidémiologie des brûlures en milieu urbain – Urgence pratique 1999 N° 32, 11-12 ;1999

Legendre M – Le nouveau casque. BSPP/BEG ADH n° 385, pp. 43-44; 1982.

Lemire JP – Les casques des sapeurs-pompiers à travers les siècles. Les cahiers de la Rosalie, ADH n° 392, pp. 13-20. 1983.

Lemon P.W.R, Hermiston R.T(a) – The human energy cost of fire fighting. J. Occup. Med. 19: 558-562, 1977

Lemon P.W.R, Hermiston R.T(b) – Physiological profile of professional fire fighters. J.Occup. Med. 19: 337-340, 1977.

Leroy C, Renais A, Bidet D, Burner P – La tenue SPF1 des sapeurs-pompiers de Paris. ADH n° 584, pp. 42-43, octobre 2000.

Leroy C, Latanzi A, Bougis T, Fantin P – L'appareil respiratoire isolant à circuit ouvert Fenzy Aeris Vox. ADH n°593 pp. 44-45, juillet 2001.

Letourneur R – La fibre synthétique sous toutes les coutures. Sapeur Pompier Magazine n°9 62, novembre 2004.

Letourneur R (a) – Tout sur la protection respiratoire. Sapeur Pompier Magazine n°968, pp.54-58, mai 2005

Letourneur R (b) – Casque F1 nouvelle génération. Sapeur Pompier Magazine n°971, septembre 2005.

Ley S, Duclos H. M - Les tenues du futur. Le Sapeur-Pompier magazine n°989, avril 2007.

Lopez A, Despret I, Penta M, Malchaire J, Thonnard J.L – Caractéristiques à requérir pour les vêtements de protection contre la chaleur et les produits toxiques. Revue de médecine du Travail, Tome XXIV, 1 :35-42 ; 1997.

Louhevaara V, Ilmarinen R, Griefahn B, Künenmund C, Mäkinen H – Maximal physical work performance with European standard based fire-protective clothing system und equipment in relation to individual characteristics. Eur J Appl Physiol. 71/ 223-229, 1995.

Loupiac E – « Les malaises dus à la chaleur guettent chaque pompier ». ADH n°594, Août-septembre 2001.

Lusa S, Louhevaara V, Smolander J, Kivimäki M, Korhonen O – Physiological responses of firefighting students during simulated smoke-diving in the heat. Am. Ind. Hyg. Assoc. J.; 5: 228-231, 1993.

Mairiaux Ph, Malchaire J – Ergonomie des ambiances physiques. Cahier de la Médecine Travaux XX, 1 :27-35 ; 1983.

Maître L – Le casque F1 à la loupe... Le sapeur-pompier magazine n° 917, octobre 2000.

Malburet J – La tenue de travail et d'intervention de la Brigade. BSPP/SA – ADH n° 390 pp.15-21 ; 1983.

Malchaire J – Ambiances des lieux de travail. Notes techniques. Commissariat général à la promotion du travail, 4^e édition ; 1980.

Malchaire J, Piette A – Logiciel d'évaluation de la contrainte thermique (version 2.2.). Louvain, Université catholique. Unité d'hygiène et physiologie du travail, 1995.

Malchaire J – Travail à la chaleur. Encyclopédie Médico-chirurgicale, n° 16-781-A-20, pp.4, Paris, Ed. Elsevier ; 1996.

Malchaire J, Kampmann B, Mehnert P, Gebhardt H, Piette A, Havenith G, Den Hartog E, Holmer I, Parsons K, Alfano G, Griefahn B – Evaluation du risque de contrainte thermique lors du travail en ambiances chaudes. Médecine et Hygiène du Travail et Ergonomie, Volume 38, n°3, 101-112 ; 2001.

Malchaire J – Stratégie générale de gestion des risques professionnels. Illustration dans le cas des ambiances thermiques au travail. Cahiers de notes documentaires –Hygiène et sécurité du travail. N°186 ; 1^{er} trimestre 2002.

Manning JE, Griggs TR – Heart rates in fire fighters using light and heavy breathing equipment: Similar near-maximal exertion in response to multiple work load conditions. Journal of Occupational Medicine, vol. 25, n°3, p. 215-218, 1983.

Marchand D, Tremblay G, Tellier C – Evaluation des contraintes physiques associées au port de différents vêtements individuels de protection des pompiers. Rapport, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, janvier 2006.

Marlot M – Port de l'ARI, formation et entraînement des sapeurs-pompiers. Le sapeurs-Pompiers, n° Hors Série, p. 432-435, 1994.

Martin G, Ben Mohamed D, De Bagneux J, Morizot S – Les EPI: protéger celui qui sauve. Soldats du Feu magazine n°4, pp. 58-69, septembre-octobre 2004.

Martinet C, Meyer J.P. – Travail à la chaleur et confort thermique. Note scientifique et technique, rapport INRS 58 pages, 1999.

Massoni P – « Accidents d'origine électrique encourus par les sapeurs-pompiers au cours des interventions dans les immeubles d'habitations ». Lettre du Préfet de Police de Paris, le 9 novembre 1994.

Mathieu D – Vêtements de protection pour sapeurs-pompiers. Le Sapeur-Pompier, n°880, pp 114-120 ; 1997.

Maury J – Description du « Paravapor ». Le Siècle Industriel du 26 septembre 1903.

McCullough E, Jones B, Tamura T – A Data Base for Determining the Evaporative Resistance of Clothing. ASHRAE Transaction, V.95, Pt 2, 3287-3299, 1989.

Médaille E – « Ils ont trop chaud dans leur nouvelle tenue ». Le parisien du 15 juin 2004.

Medelli J, Fullana J.F – Aptitude cardio-vasculaire du sapeur-pompier. Urgence Pratique n°10, p. 37-40, 1995.

Medelli J, Bouferrache B, Mejdoub N, Lambert M, Dormokray P, Fullana J.F – Coût énergétique du port de l'ARI. Urgence Pratique n°18, p. 25-29, 1996.

Medelli J, Fullana J.F – Port de l'ARI et évaluation de l'aptitude physique du SP ; 3SM mag n°1, magazine du service de santé et de secours médical, juin 2002.

Melin B, Etienne S, Iejeune D, Charpenet A, Jimenez C, Pelicand J.Y, Giudice M, Warmé-Janville B – Effects on body hydration of two thermal assistance systems during operational activities in NBC protective suits and tropical climate. In conférence of Thermal protection of man under hot and hazardous conditions, Paris, march 1999

Melin B, Jimenez C, Leifflein D, Bourdon L, Fidier N, Clerc N, Pelicand J.Y, Warmé-Janville B, Anelli B – Chaleur et protection NRBC, incidence sur la capacité opérationnelle. 1^{ère} biennale de la recherche du Service de Santé des Armées, HIA Val de Grâce, Paris 8-9 juin 2004.

Melin B, Warmé-Janville B – Effets de systèmes d'assistance thermique sur le niveau d'hydratation corporelle lors de l'activité physique en tenue légère de décontamination en environnement chaud. Etude préliminaire en laboratoire. Rapport technique n°11/CRSSA/FH/BEE, avril 1998.

Meteorological Office – Extrait du GAM-EG-13, annexe données climatiques pour Paris, 1991. Tables of temperature, relative humidity, précipitations and sunshine for the world. Part III, Europe et Açore. MET O. 856C, HMSO, Londres, 1973

Mierley MC, Baker SP – Fatal house fire in an urban population, JAMA, 249: 1466-8; 1983.

Michaelis P – Expertise de l'incendie survenu le 14 septembre 2002 à Neuilly-sur-Seine (dossier confidentiel). Risk Assessment Expert TotalFinaElf ; mars 2003.

Minerva D – Le surpantalon, un vêtement de protection supplémentaire pour plus de sécurité. BSPP/BIRP – ADH n°506 pp. 62-63 ; 1993.

Muller A – Un projet national pour les objectifs de performance – Ingénierie de la sécurité incendie. Laboratoire du feu et de l'environnement. Face au risque n°421, pp. 14-15, 2006.

Muraz-Moscicki C, Morin J – L'incendie en milieu domestique. Pr2ventique Sécurité n°40, pp. 44-53, Juillet –Août 1999.

Musk A.W, Monson R.R, Peters J.M, Peters R.K – Mortality among Boston firefighters, 1915-1975. *Br.J.Ind.Med.*, 35, 104-108; 1978.

Myhre L.G, Holden R.D, Baumgardner F.W, Tucker D – Physiological limits of fire fighters. Final report. Books Air Force Base. San Antonio, Texas : Air Force School of Aerospace Medicine. Report n°ESL-TR-79-06, June 1979.

Naves A – FELIN : une réponse pragmatique. DGA - Armées d'aujourd'hui N° 224, 4-6 ; 2001.

Neveux-Huben C – Les acteurs de l'urgence face au stress. Urgence Pratique, 22 : 9-14 ; 1997.

Nicol-Roy F – Aptitude au port de l'ARI. Service médical du SDIS de la Loire-Atlantique. CES biologie et médecine du sport. Le sapeur-pompier magazine ; p. 260-263, 1992.

Nielsen R, Olesen BW, Fanger PO – „Effect of physical activity and air velocity on the thermal insulation of clothing “, *Ergonomics*, vol.28, n° 12, pp. 1617-1631, 1985.

Nivet P, Alby J.M, Crocq L – Les réactions émotionnelles chez les décideurs, les sauveteurs et les soignants. Soins Psychiatriques ; 106/107 : 18-22 ; 1989.

Noto R – Les risques du métier. ADH n° 404, pp. 17-24, mai 1984.

Noto R – Stress et catastrophe (le stress chez les sauveteurs). Neuro-Psy., 4/201-207 ; 1989.

Noto R – Les explosions. Cycles de conférences 1999-2000. Actes des conférences de réanimation pré hospitalières ; janvier 2000.

Olesen BW, Sliwinska E, Madsen TL, Fanger PO – „ Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing; Measurements by a movable thermal manikini ”, ASHRAE Transactions, vol. 88, pp. 791-805, 1982.

Organisation internationale de normalisation – ISO 9237 : Textiles – Détermination de la perméabilité à l'air des étoffes, 5 pages ; 1995.

Pandolf K.B, Givoni B, Goldman R.F – Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. J. Appl Physiol 43:577-583, 1977.

Pham D, Michelier P, Agnoli A, Sermoz P, Bruna J.J, Buchart V, Vittoz P, Baptiste O – Exercice en ambiance chaude, variations physiologiques. Sapeur-pompier magazine n°966, mars 2005.

Pourny C – Mission sécurité sapeurs-pompiers. Ministère de l'intérieur et des libertés publiques ; Rapport de mission sur la sécurité des sapeurs-pompiers en intervention ; 2003.

Proust J. P – Préfet de Police de Paris – « Présentation du plan de modernisation 2002-2007 de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris », Ministère de l'Intérieur, Préfecture de Police de Paris, 2002.

Prim C – Etude statistique sur les accidents survenus en service commandé aux sapeurs-pompiers communaux et départementaux en 1980. « Sécurité civile et Industrielle » n°318 ; 1982.

Prim C – Les accidents du travail chez les sapeurs-pompiers non militaires. Fréquence – Bilan et causes – Aspects juridiques. « Sécurité civile et industrielle » n°371 ; 1987.

Prim C – Les risques agressologiques du métier de sapeur-pompier. « Le Sapeur-Pompier » n° 802 et n° 803 ; 1989.

Rancurel A – Etudes expérimentales du retentissement physiologique des tenues de protection et d'incendie des sapeurs-pompiers. Thèse en médecine, faculté de médecine de Marseille, 1998.

Raven PB, Davis TO, Shafer CL, Linnebur AC – Maximal stress test performance while wearing a self-contained breathing apparatus. J Occup Med 19:802-806, 1977.

Reungoat P, Lelaurain V, Méchineau O, Rouilleaux I, Gonzalez C, Lembeyle C, Gerville-Réache L, Cazorla G, Brochard P – Description des variations de la fréquence cardiaque enregistrée chez 104 sapeurs-pompiers au cours d'un exercice d'entraînement au port de l'appareil de protection individuelle à circuit ouvert. 1^{re} Journée d'Information Santé Travail, Hôpital d'Instruction des Armées du Val de Grâce, 21 janvier 2005

Richards MGM – Physiological studies of humans wearing fire fighter clothing systems for the validation of a sweating manikin. Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Ergonomics: 07, 401-404, 2000

Richards MGM, Mattle NG – Development of a sweating agile thermal manikin (SAM). Proceedings of the Fourth International Meeting on Thermal Manikins, EMPA Schwitterland, 27-28 sept. 2001.

Richards MGM, Mattle NG – Assessment of the protection and comfort of fire fighter's clothing using a sweating manikin, 2nd European Conference on Protective Clothing (ECPC) and NOKOBETEK 7, Montreux, Switzerland, 2003.

Richards MGM, Fiala D – "Modelling fire-fighter responses to exercise and asymmetric infrared radiation using a dynamic multi-mode model of human physiology and results from the Sweating Agile thermal Manikin". Eur. J.Appl. Phys., 92 (6), pp.649-653, 2004.

Richardson JE, Capra MF – Physiological responses of firefighters wearing level 3 chemical protective suits while working in controlled hot environments. J Occup Environ Med 43: 1064-1072; 2001

Richter F, Lienhard A, Fuilla C – Défibrillation et prompt secours. Actualités et perspectives en milieu parisien. Revue du SAMU 1 :5-8 ; 1992.

Rio JF – La seconde vie d'Eric Vauthier. BSPP/BIRP – ADH n° 518, pp 31-38; 1994.

Rolland D – L'évolution des casques parisiens. BSPP/BEG – ADH n°585, pp. 50-53; 2000.

Rolland D – La double carrière du capitaine Krebs. ADH n° 618, pp. 54-57 ; 2002.

Romet TT, Frim J – Physiological responses to fire fighting activities. Eur J Appl Physiol Occup 56: 633-638; 1987.

Rossi R - Heat and fire: the influence of moisture. TUT n°15, 1st quarter 1995.

Rossi, R.M. and Zimmerli, T., "Influence of Humidity on the Radiant, Convective and Contact Heat Transmission Through Protective Materials", Performance of Protective Clothing: Fifth Volume, ASTM STP 1237, J.S. Johnson and S.Z. Mansdorf, eds., American Society for Testing and Materials, West Cngshohocken, PA, pp. 269-280; 1996.

Rossi R – Les membranes résistent-elles à la chaleur ? Textiles à usages techniques, n°25,3^e trimestre 1997.

Rossi R, Camenzind M, Bolli W – Assessment of Radiant Heat Protection of Firefighters' Jackets with a Manikin. Performance of Protective Clothing: Issues and Priorities for the 21st Century: Seventh Volume, ASTM STP 1386, pp. 212-223, 2000.

Rossi R – Vêtement de pompiers: le choix entre protection et confort. Textiles à usages techniques, n°41, 3^e trimestre 2001.

Rossi R – Firefighting and its influence on the body. Ergonomics 46, 1017-1033, 2003.

Rossi R, Camenzind M, Richards MGM, Burggmann G, Bolli WP – Assessment of thermal comfort and heat protection of fire-fighters' protective clothing. Laboratory for protection and Physiology, Empa, Materials Science and Technology, CH-9014, St-Gallen, Switzerland; 2005.

Rossi R, Mattle N, Camenzind M (a) – Etude de la performance physiologique sur le mannequin transpirant « SAM » et de la protection contre la chaleur de vêtements de protection pour sapeurs-pompiers sur le mannequin thermique « Henry ». Rapport d'étude N°205118, Laboratoire de protection et physiologie EMPA, Saint-Gallen (Suisse) 22 pages, 02-2006.

Rossi R, Bolli W, Stämpfli R – Thermal and mechanical performance of firefighters' protective clothing after heat exposure. Empa, Switzerland. 3rd European Society of Protective Clothing Congress: "Protective clothing for fire-fighters" Gdynia, Poland, 10-12 May 2006.

Rossi R, Mattle N, Camenzind M (b) – Etude de la performance physiologique sur le mannequin transpirant « SAM » et de la protection contre la chaleur de vêtements de protection pour sapeurs-pompiers sur le mannequin thermique « Henry ». Rapport d'étude N°205118-2, Laboratoire de protection et physiologie EMPA, Saint-Gallen (Suisse) 26 pages, 08-2006.

Rumler R, Helbig A – Arbeitsmedizinische Untersuchung und wissenschaftliche begründete Stellungnahme zur Belastung und Beanspruchung von Übungsleitern beim Betrieb der Feuerlösch-Übungsanlage. Würzburg, 2002.

Rüttiman M – « L'atteinte psychologique en intervention ». Médecin principal, responsable du Service d'Urgence de la Brigade. Allo Dix-Huit N° 583 ; p.34 ; août-septembre 2000.

Rüttimann M, Fortin JL, Meurgey F, Domanski L, Kowalski JJ – Gestion médicale des intoxications par les fumées d'incendie en milieu souterrain. Médecine de catastrophe et secours collectifs. La revue des SAMU, pp. 87-92 ; 2003.

Sainrat A, Blanc C – Les essais de réaction au feu des produits du bâtiment et l'harmonisation européenne. Divisions « Comportement au feu » et « Essais feu bâtiment » au Laboratoire National d'Essais. Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles, n°214, pp. 3-9, 2003.

Sagot J.C – Ambiances thermiques, Equipes de Recherche en Ergonomie et Conception, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Journées « Ambiances Thermiques », Cognac, juin 2002.

Santot P – Cette peau qui protège la notre. ADH n° 482, pp. 17-19, juin 1991.

Savourey G – Physiological evaluation of protective equipments in man in laboratory : value and limits. Centre de Recherche du Service de Santé des Armées. In conférence of Thermal protection of man under hot and hazardous conditions, Paris, march 1999.

Savourey G, Launay JC, Melin B – Physiopathologie et prévention des troubles liés à l'exposition à la chaleur ou au froid. ADSP n°45 pp 4-8, 2003.

Savourey G, Besnard Y – Logiciel de simulation de la contrainte thermique et de prédiction des temps de tolérance physiologique lié aux environnements opérationnels : « Predictol ® », version 2.1.0, CRSSA, Département des facteurs humains, Pôle tolérance et vêtement. Logiciel déposé auprès de l'APP, novembre 2004.

Scherrer J, Monnod H – Le travail musculaire local et la fatigue chez l'homme. J Physiol. Paris 52 : 419-501 ; 1960.

Scherrer J – Précis de physiologie du travail. Notions d'ergonomie. 1 Vol., p.585, Ed Masson 1981.

Schopper-Jochum S, Schubert W, Hocke M – Comparative Evaluation of the Wear Behaviour of Fire Turnout Jackets – Phase I. Séminaire Gore, mai 1999.

Schmauch J.F (a) – Les fumées d'incendie: opacité, toxicité, vitesse de production... Le Sapeur-Pompier Magazine, n°961, février 2001.

Schmauch J.F (b) – Les fumées d'incendie comment s'en protéger... Le Sapeur-Pompier Magazine, n°962, mars 2001.

Siebrecht M – Verhalten von Pressluftatmern einschliesslich Druckluftbehälter unter extrem hohen Temperaturbedingungen. Exam BBG GmbH, Essen. 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., In Salzburg vom 21. bis 25. Mai 2006.

Skoelstroem B – Physiological responses of fire-fighters to workload and thermal stress. Ergonomics 30: 1589-1597, 1987.

Smith D.L, Petruzzello S.J, Kramer J.M, Misner J.E – The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of fire-fighters to a training drill. Ergonomics, 40, p. 500-510, 1997.

Soccorsi L – Mort subite et stress. Communication au IV^e congrès national des services de santé des sapeurs-pompiers. Mulhouse, 1986.

Sorensen N, Eaton P, Healey – A new facility for testing the fire protective performance of ensembles of PPE. BTTG Fire Technology Services, UK. 3rd European Society of Protective Clothing Congress : "Protective clothing for fire-fighters" Gdynia, Poland, 10-12 May 2006.

Sothmann MS, Saupe K, Jasenof D, Blaney J – Heart rate reponse of firefighters to actual emergencies. Implications for cardiorespiratory fitness. J Occup Med 34; 797-800; 1992.

Soton R – Il y a 25 ans : Blanche essaie ses nouvelles tenues de feu SPF1. ADH n°659 Juillet-Août, p.54-55 ; 2007.

Stanag 2895 – Extrêmes climatiques et conditions dérivées pour les matériels des forces de l'OTAN. Norme militaire en diffusion restreinte.

Stemmelen M – Les équipements de protection individuelle (E.P.I.). Lieutenant, BSPP/HCCA – ADH, pp. 33-38 ; novembre 1995.

Stemmelen M, Cantarel D – Les vêtements de protection textile de la Brigade. BSPP/HCCA – ADH n° 594 pp. 46-47 ; 2001.

Stolwijk J.A – Mathematical model of thermoregulation. Physiological and behavioural temperature regulation. Hardy, Gagge, Stolwijk eds, Cthomas publisher, Springfield, pp 703-721, 1970.

Tack DW, Webb RDG, Walsh C – Age and physiological responses to heat and activity when wearing fire-fighters turnout gear. Proceedings of the 1984 International Conference on Occupational Ergonomics, 1984.

Tattersall AJ, Thomas NT – Flames and sweat: A physiological assessment of fire fighting apparel. Contemporary Ergonomics, Proceedings of the Ergonomics Society's: Annual conference, 27-29 mars 1985.

Thiriot L – Vestes d'intervention : une solution sans compromis. Textile à Usage Technique, n° 30 bis, pp 10-12 ; 1999.

Thomas WC, O'Flaherty E.J – Cytochrome C oxydase activity in tissues of rat exposed to polyurethane pyrolysis fumes. Toxicol Appl Pharmacol; 49: 463-472; 1979.

Tokuo Ogawa – Les troubles provoqués par la chaleur. Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, 3^e édition. Chapitre 42.1, 2001.

Torres E – Contraintes physiologique liées au port de l'appareil respiratoire isolant à circuit ouvert chez le sapeur-pompier. Masters Dissertation in Biological Capacity and Sports Medicine; Université Aix-Marseille, 1997.

Torres E – L'ARI: un outil lourd de contraintes. Soldats du Feu magazine, Hors Série N°3, 2006.

Vardy B, Waldock W – « Protection offerte par les combinaisons de vol » pp. 4-7 ; Vortex n°3/2004.

Venes le Morvan M. A – Les réglementations française et européenne. Soldats du Feu magazine, Hors Série n°1, 2005.

Vogel C – A fire fighter turnout gear with integrated sensors. Textiles à Usage Technique, n°46, 4th quater 2002.

Vogt J.J – Confort physiologique. Science de l'Ingénieur ; B2 180-1 à 10, 1985

Vogt J.J – « La chaleur et le froid ». Les risques professionnels- Encyclopédie de sécurité et de santé au travail ; chapitres 42.2 – 42.54, 2001.

Von Björn Lüssenheide E – Atemschutzunfälle von 1993 bis 2003 in Deutschland die unter [www . Atemschutzunfälle. de](http://www.atemschutzunfaelle.de) registriert wurden, Site internet: [www. atemschutzunfaelle. de](http://www.atemschutzunfaelle.de), 2003.

Warmé-Janville B, Monfort E, Pélicand J-Y – Efficiency measurement of microclimate cooling systems by using an instrumented maniki. Direction des Centres d'Expertises et d'essais/centre d'études du Bouchet (91) - in conférence of Thermal protection of man under hot and hazardous conditions, Paris, march 1999 .

Warmé-Janville B (a) – Mesure des caractéristiques physiques et ergonomiques des tenues d'intervention de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris. Rapport RP 220/CEB/326/CE, juin 2002.

Warmé-Janville B (b) – Première évaluation du modèle de simulation des transferts thermiques SIMTEX. Rapport n° RP 241/CEB/288CI, novembre 2002.

Warmé-Janville B, Jacques F – Tenue d'intervention de la BSPP ancienne et nouvelle générations, étude ergonomique et limites d'utilisation. BSPP Champerret, Paris 19 mars 2003.

Warmé-Janville B (a) – Mesure de la perméabilité à la sueur des tenues ancienne et nouvelle générations de la BSPP. PVE/ESD/03-51/NC, juillet 2003.

Warmé-Janville B (b) – Approche par simulation numérique des limites d'utilisation de la nouvelle tenue d'intervention de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris. Rapport n°RP 03-282/CEB/41130095-version 1, décembre 2003.

Warmé-Janville B, Pelicand J.Y, Bugat R (a) – Evaluation en laboratoire des limites d'utilisation de la nouvelle tenue d'intervention de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris. Rapport RP/04-307/CEB/41130095/NC, version 1, juin 2004.

Warmé-Janville B, Pellicand J.Y, Jacques F, Michelet F, Chelingue C, Meurgey M (b) – Essais à la maison du feu du nouvel équipement d'intervention de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris. Rapport RP/04-332/CEB/41130100/NC Version 1, 24 pages, août 2004.

Warmé-Janville B (a) – Mesure de la perméabilité de sous-vêtement de la BSPP. PVE/ESD/05-37/NC, juillet 2005.

Warmé-Janville B (b) – Mesure de la perméabilité de sous-vêtement de la BSPP. PVE/ESD/05-80/NC, novembre 2005.

Warmé-Janville B, Pellicand J.Y, Jacques F, Chelingue C – Durées limites d'intervention avec le nouvel équipement tout textile de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris – Essais à la maison du feu de Villeneuve Saint Georges. Rapport RP/06-429/CEB/41140177/NC Version 1, 21 pages, janvier 2007.

Wassermann D – Evaluation de la gravité des brûlures : physiopathologie. Urgence pratique n°32, pp 5-9, 1999.

Wouter A. Lotens – Heat exchange through clothing. Evaluation de la contrainte thermique, encyclopédie de sécurité et de santé au travail, pp 42.26 – 42.32, 1985.

Zaglia C, Alibert G – Les nouveaux textiles : la résistance au feu devient une priorité. Mission régionale du textile technique. ADH n° 562, octobre 1998.

Zaglia C, Boisard J – Un casque sur mesure. Le casque F1 a 20 ans cette année. Soldats du Feu magazine, Hors Série n°1, 2005.

Zenhacker J, Levy D – Mort subite en service commandé. Communication au IV^e congrès national du service de santé des sapeurs-pompiers, Mulhouse ; 1988.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	2
LISTE DES TABLEAUX	2
LEXIQUE	2
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
CHAPITRE 1. LES RISQUES ET LES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION LIÉS AUX INTERVENTIONS DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE	2
1.1. L'activité opérationnelle des pompiers en France et les dangers du métier de sapeur-pompier	2
1.1.1. Un métier diversifié aux risques variés	2
1.1.1.1. Des tâches multiples	2
1.1.1.2. Les risques du métier	2
1.1.2. Les dangers d'un incendie	2
1.1.2.1. La problématique des feux	2
1.1.2.2. Le caractère dangereux des fumées et des gaz chauds	2
1.1.2.3. Le risque de brûlure	2
1.1.2.4. Les contraintes et les astreintes physiques et physiologiques des sapeurs pompiers lors d'une intervention sur feu	2
1.1.2.5. Les troubles musculo-squelettiques	2
1.1.2.6. Le stress physique et psychologique du pompier	2
1.1.2.7. Les intoxications lors des déblaiements	2
1.1.3. Enseignements issus des accidents	2
1.1.3.1. Constats	2
1.1.3.2. Evolution des règles de construction	2
1.1.3.3. Réflexions sur la conduite de l'attaque du feu	2
1.2. Les équipements de protection individuelle (EPI)	2
1.2.1. Historique	2
1.2.2. Des équipements de protection individuelle conçus selon de nouvelles normes.	2
1.2.3. La protection de la tête	2
1.2.4. Les évolutions techniques de la protection respiratoire	2
1.2.5. Les leçons d'un drame	2
1.2.6. Une nouvelle génération d'équipements	2

CHAPITRE 2. CARACTÉRISTIQUES DES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE 2

2.1. Détermination des caractéristiques techniques et ergonomiques des ensembles d'intervention	2
2.1.1. Description des équipements	2
2.1.2. Bilan massique des équipements E1 et E2Co	2
2.1.3. Perméabilité à l'air des équipements E1 et E2Co	2
2.1.4. Isolement thermique des équipements E1 et E2Co	2
2.1.4.1. Principes et définitions générales	2
2.1.4.2. Evaluation de l'isolement thermique des équipements E1 et E2Co	2
2.1.4.3. Isolement thermique des équipements E1 et E2Co	2
2.2. Détermination de la résistance à la vapeur d'eau des ensembles d'intervention	2
2.2.1. Définition des résistances thermique sèche et évaporatoire	2
2.2.1.1. Mesures sur mannequin transpirant	2
2.2.1.2. Isolation thermique sèche R_{ct}	2
2.2.1.3. Résistance évaporatoire R_{et}	2
2.2.2. Détermination des caractéristiques d'un nouveau sous-vêtement, le « polo F2 » expérimental.	2
2.2.2.1. Indices de confort statique, dynamique et de sécurité thermique	2
2.2.2.1.1. Indice de confort statique	2
2.2.2.1.2. Indice de confort dynamique	2
2.2.2.1.3. Indice de sécurité thermique	2
2.2.2.2. Méthodologie	2
2.2.2.3. Choix des échantillons	2
2.2.2.4. Perméabilité à la vapeur, indices de confort statique, dynamique et de sécurité thermique des différents polos testés	2
2.2.2.5. Définition des caractéristiques techniques du « polo F2 » expérimental	2
2.2.3. Evaluation des résistances thermique sèche et évaporatoire des ensembles E1, E2, E2Co et E3 sur mannequin transpirant articulé	2
2.2.3.1. Méthodologie	2
2.2.3.2. Equipements évalués	2
2.2.3.3. Résistances thermiques sèches et résistances à la vapeur d'eau des différents équipements testés	2
2.2.3.4. Chaleur totale perdue et résistance à la vapeur d'eau, R_e	2
2.2.3.5. Accumulation de l'humidité dans les vêtements	2

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT ET RÉACTION AU FEU DES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION 2

3.1. Comportement des équipements soumis à un flux thermique modéré	2
3.1.1. Protocole expérimental	2
3.1.2. Tenues soumises aux essais à chaleur radiante	2
3.1.3. Résultats des mesures pour un flux de 5 kW/m ²	2
3.1.3.1. Mesures des températures surfacique et du mannequin	2
3.1.3.2. Evaluation des brûlures	2
3.1.3.3. Synthèse	2
3.1.4. Résultats des mesures pour un flux de 10 kW/m ²	2
3.1.4.1. Humidification des vêtements	2
3.1.4.2. Températures mesurées à la surface des vêtements	2
3.1.4.3. Températures mesurées à la surface du mannequin	2
3.1.4.3. Estimation des brûlures	2
3.1.4.4. Masse perdue par les sous-vêtements durant les tests	2
3.1.4.5. Synthèse relative aux essais à flux thermique modéré	2

3.2. Comportement des équipements soumis à un flash thermique	2
3.2.1. Méthodologie d'évaluation des équipements soumis à un flash thermique	2
3.2.1.1. Principe de réalisation des essais avec le mannequin Thermo-man ^{md}	2
3.2.1.2. Protocole expérimental et tests réalisés	2
3.2.2. Analyse visuelle des équipements	2
3.2.2.1. Etat général de l'équipement E1 à la suite des tests n°1 et n°2	2
3.2.2.2. Etat général des équipements E2 et E3 à la suite des tests n° 3 et n°4	2
3.2.3. Estimation des brûlures	2
3.2.3.1. Estimation des brûlures pour les tenues E1	2
3.2.3.2. Estimation des brûlures pour les tenues E2 et E3	2
3.2.4. Synthèse relative aux essais de flash thermique	2
3.3. Synthèse	2

CHAPITRE 4. ETUDES PRÉLIMINAIRES AUX ESSAIS SUR L'HOMME EN CONDITIONS RÉELLES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE **2**

4.1. Simulations numériques de scénarios laboratoire et opérationnel	2
4.1.1. Bilan thermique et contrainte thermique	2
4.1.1.1. Bilan thermique	2
4.1.1.1.1. La conduction K	2
4.1.1.1.2. La convection C	2
4.1.1.1.3. Le rayonnement R	2
4.1.1.1.4. L'évaporation E	2
4.1.1.2. La contrainte thermique	2
4.1.1.4. Le métabolisme	2
4.1.1.5. Seuils de danger et durées limites d'exposition (DLE)	2
4.1.1.5.1. La mouillure cutanée maximale (w_{max}).	2
4.1.1.5.2. La sudation maximale (sw_{max}) :	2
4.1.1.5.3. La perte hydrique maximale (D_{max})	2
4.1.1.5.4. Le stockage maximal de chaleur (Q_{max})	2
4.1.1.5.5. Durée limite d'exposition (DLE)	2
4.1.2. Simulation numérique de la contrainte thermique pour un scénario « laboratoire » et un scénario opérationnel	2
4.1.2.1. Modèles d'évaluation de la contrainte thermique	2
4.1.2.2. Le scénario « laboratoire »	2
4.1.2.3. Le scénario « opérationnel »	2
4.1.2.4. Résultats des simulations du scénario « laboratoire » en ambiance thermique modérée	2
4.1.2.4.1. Influence de la masse des équipements sur le coût métabolique	2
4.1.2.4.2. Evolution des DLE « thermiques » et « hydratation » en fonction de la charge de travail	2
4.1.2.4.3. Evolution de la DLE en fonction des conditions ambiantes	2
4.1.2.4.4. Simulation du scénario laboratoire avec Protect®	2
4.1.2.5. Résultats des simulations du scénario opérationnel avec le logiciel Predictol	2
4.1.2.5.1 Scénarios opérationnels simulés	2
4.1.2.5.2. Résultats des simulations	2
4.2. Essais sur l'Homme en laboratoire sur tapis motorisé	2
4.2.1. Protocole expérimental	2
4.2.1.1. Les sujets	2
4.2.1.2. Evaluation de l'astreinte thermique par des mesures physiologiques	2
4.2.1.2.1. Mesure de la température du noyau central du corps, t_{cr}	2
4.2.1.2.2. Mesure de la température cutanée, t_{sk}	2
4.2.1.2.3. Mesure de la fréquence cardiaque	2
4.2.1.2.4. Mesure de la variation de la masse corporelle due à la sudation	2
4.2.1.3. Scénario « laboratoire »	2

4.2.2. Résultats des tests	2
4.2.2.1. Fréquence cardiaque	2
4.2.2.2. Température du corps	2
4.2.2.3. Stockage thermique	2
4.2.2.4. Perte hydrique	2
4.2.2.5. Synthèse des essais	2
 CHAPITRE 5. DÉFINITION DES DURÉES D'ENGAGEMENT DU SAPEUR-POMPIER EN CONDITIONS RÉELLES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE	 2
5.1. Protocole expérimental	2
5.1.1. Plateaux techniques	2
5.1.1.1. Description des installations	2
5.1.1.2. Ambiances thermiques	2
5.1.2. Scénario de manœuvre	2
5.1.3. Mesure de l'astreinte thermique	2
5.2. Evaluation des durées d'engagement	2
5.2.1. Caractéristiques des essais	2
5.2.1.1. Les sujets et leur équipement	2
5.2.1.2. Ambiances thermiques	2
5.2.2. Evolution des paramètres physiologiques	2
5.2.2.1. Evolution de la fréquence cardiaque moyenne	2
5.2.2.2. Evolution de la température centrale moyenne et du stockage thermique	2
5.2.3. Evolution de l'indice de charge physique	2
5.3. Validation et confirmation des durées d'engagement sous ARI	2
5.3.1. Caractéristiques des essais	2
5.3.1.1. Les sujets et leur équipement	2
5.3.1.2. Ambiances thermiques	2
5.3.2. Evolution des paramètres physiologiques	2
5.3.2.1. Evolution des fréquences cardiaques	2
5.3.2.2. Evolution de la température centrale	2
5.3.2.3. Evolution de la température cutanée	2
5.3.3. Evolution du stockage thermique et de la charge physique	2
5.3.3.1. Evolution du stockage thermique	2
5.3.3.2. L'indice de charge physique	2
5.4. Synthèse des tests en conditions réelles de lutte contre l'incendie	2
 CONCLUSION	 2
 BIBLIOGRAPHIE	 2
 TABLE DES MATIÈRES	 2
 ANNEXE	 2

Annexe

Questionnaire sur les EPI - Retour d'expérience

Le principe utilisé pour les réponses repose essentiellement sur un choix gradué parmi cinq propositions.

Il s'agit souvent de comparer la veste en textile par rapport à la veste en cuir.

Certaines questions permettent des réponses libres ou des commentaires.

D'autres ne nécessitent qu'une réponse par « oui », par « non » ou en rayant la mention inutile.

GENERALITES

NOM : (facultatif) Prénom : (facultatif)

N°Inc : Cie : CS..... (facultatif)

Age : Sexe : Taille : Poids :

Ancienneté BSPP :années

Nombre d'années BSPP avec port de la veste de protection en cuir : années

Pompier volontaire : oui non (*rayer la mention inutile*)

Si oui : êtes-vous équipé en cuir ou en textile dans votre CS civil ?

Cuir ☐ Textile ☐

Date de perception des deux ensembles de protection textile :

Date de perception des deux cagoules :

N° des EPI (*numéro inscrit au feutre indélébile au dessus de votre numéro d'incorporation*)

Veste 1 :

Sur-pantalon 1 :

Cagoule 1 :

Veste 2 :

Sur-pantalon 2 :

Cagoule 2 :

I. DOTATION, LAVAGE ET REPARATION DE VOS EPI

1.1. Nombre de lavages depuis la perception des ensembles de protection textile?

1.11 Renseignez-vous le tableau placé en fin de la notice d'utilisation de vos ensembles de protection textile (réponse oui ou non) ?

Oui

Non

1.12 Avez-vous eu à mettre les deux ensembles de protection textile simultanément au lavage ?

Oui

Non

1.2. Si vous en avez rencontrés, quels sont les problèmes liés au lavage :
- des ensembles de protection textile ;
- des cagoules

1.3. Avez vous essayé de nettoyer vos ensembles de protection textile seul ? (au CS ou à votre domicile)

Oui

Non

1.4. Si oui, pour quel type de nettoyage ? (entourez la mention retenue)

brossage
lave-linge

lavage à l'éponge,
pressing

autre

1.5 Quel est votre avis sur la qualité du lavage des ensembles de protection textile ? (Entourez la mention retenue)

Très mauvais

mauvais

assez bien

bien

très bien

1.6. Avez-vous eu à faire réparer vos ensembles de protection textile ?
(Entourez la mention retenue)

OUI

NON

Durée de l'indisponibilité :

Autres remarques liées à la réparation :

1.7. Avez-vous réparé votre ensemble de protection textile vous-même et pourquoi?

1.8. A quoi sert la trappe de visite dans la veste de protection textile ?

1.9. Quand, où et comment lavez-vous vos cagoules ?

.....
.....
.....
.....
.....

II. UTILISATION DE VOS EQUIPEMENTS

2.1 Avez- vous participé à une ou plusieurs interventions et /ou exercices avec une chaleur rayonnante importante ? (Cochez la case)

De 0 à 5 fois ☐ de 5 à 10 fois ☐ + de 10 fois ☐

2.2 Selon vous, dans quels cas le port du sur-pantalon vous paraît-il inadapté ?

2.3 Avez vous remarqué une différence de confort avec le nouveau sur-pantalon ? (Entourez la mention retenue)

OUI

NON

Si non, pour quelles raisons?

2.5 Votre nouveau sur-pantalon vous protège-t-il mieux contre les effets thermiques ?

Si oui, pourquoi ?

Si non, pourquoi ?

Portez-vous le gilet de signalisation haute visibilité par dessus la veste de protection textile, lors de certaines interventions sur la voie publique :

- feu de véhicule VP : oui non
- feu de poubelle sur VP : oui non
- fuite de gaz sur VP : oui non

Votre cagoule vous empêche-t-elle de percevoir la chaleur rayonnante ?

(Entourez la mention retenue)

OUI

NON

2.7 Votre cagoule contribue-t-elle réellement à une meilleure protection?

III. CONFORT

(par comparaison avec la veste en cuir et avec ajout de la cagoule)

3.1. Trouvez- vous la nouvelle tenue de feu ? (ensemble de protection textile et cagoule) *(Cochez la case)*

- ☐ Beaucoup moins confortable
- ☐ Moins confortable
- ☐ Aussi confortable
- ☐ Assez confortable
- ☐ Très confortable

3.2 Votre impression à propos de la solidité de ces nouveaux vêtements est
(Cochez la case)

- ☐ Très mauvaise
- ☐ Mauvaise
- ☐ Assez bonne
- ☐ Bonne
- ☐ Très bonne

3.3 Votre impression (ou votre constat) à propos du transfert d'humidité est
(Cochez la case)

- ☐ Très mauvaise
- ☐ Assez mauvaise
- ☐ Identique au cuir
- ☐ Assez bonne
- ☐ Très bonne

3.4 Par rapport à la veste de cuir, vous avez constaté que la température à l'intérieur de la veste de protection en textile (Cochez la case)

- ☐ Beaucoup plus chaud
- ☐ Un peu plus chaud
- ☐ Identique
- ☐ Un peu moins chaud
- ☐ Beaucoup moins chaud

3.5 Que portez- vous habituellement sous la veste de protection textile ?
(Plusieurs choix possibles , cochez la case ou les cases)

- ☐ Un maillot de corps + 1 polo + 1 veste F1
- ☐ Un maillot de corps + 1 polo + 1pull
- ☐ Un maillot de corps + 1 polo
- ☐ Un polo + 1 veste F1
- ☐ Un polo et un pull
- ☐ Un polo manches courtes seulement
- ☐ Un polo manches longues seulement
- ☐ Un maillot de corps en coton uniquement
- ☐ Un polo uniquement
- ☐ Un maillot de sport BSPP (rouge ou bleu marine)
- ☐ Un maillot de sport civil en coton
- ☐ Un maillot en matière synthétique

Que préférez-vous porter ?

- ☐ Un polo manches courtes
- ☐ Un polo manches longues
- ☐ Un maillot de sport rouge
- ☐ Un maillot de sport bleu avec lettres jaunes
- ☐ Un maillot de sport civil en matière « respirante » (Cool Max, Dry Clim, foot athlétisme,...)
- ☐ Un maillot de corps en coton blanc, type BSPP

IV. UTILISATION APRES LE SPORT

4.1 Comparez votre niveau de transpiration (entre veste textile et veste en cuir)
(Cochez la case)

Avec une veste en textile vous transpirez :

- ☐ Pas du tout
- ☐ Beaucoup moins
- ☐ Moins
- ☐ Autant
- ☐ Un peu plus
- ☐ Beaucoup plus

4.2 Lorsque vous partez en intervention pendant une séance de sport, vous conservez (plusieurs choix possibles, cochez la ou les cases)

- ☐ Le short ou cuissard synthétique que vous utilisiez lors de la séance
- ☐ Le tee-shirt BSPP, civil ou de la compagnie que vous portiez lors de la séance
- ☐ Polo ou maillot de sport BSPP propre et sec
- ☐ Tee-shirt civil

4.3 Juste après une séance de sport, lors de l'intervention avec port de l'ensemble de protection textile, transpirez – vous ?
(en comparaison avec la veste en cuir) (Cochez la case)

- ☐ Beaucoup plus
- ☐ Un peu plus
- ☐ Autant
- ☐ Un peu moins
- ☐ Beaucoup moins

4.4 Après l'intervention et après avoir transpiré dans la tenue de protection textile, avez-vous des frissons ou avez vous froid ? (Cochez la case)

- ☐ Jamais
- ☐ Parfois
- ☐ Autant qu'avec la veste en cuir
- ☐ Plus souvent
- ☐ Beaucoup plus souvent

4.5 Pensez-vous qu'un gilet réfrigérant pourrait améliorer les conditions d'engagement des personnels d'attaque ?

OUI

NON

V. IMPERMEABILITE

Avez-vous été mouillé en intervention ou en manœuvre ?

- ☐ par la pluie
- ☐ par des eaux projetées par les lances ou ruisselantes
- ☐ par votre sueur

OUI

NON

5.2 Avez vous constaté que l'imperméabilité était ?
(par rapport à la veste en cuir) (Cochez la case)

- ☐ Inexistante
- ☐ Légèrement inférieure
- ☐ Identique au cuir
- ☐ Légèrement supérieure
- ☐ Totale

5.3 Votre veste de protection textile sèche –t-elle ? (par rapport à la veste en cuir)
(Cochez la case)

- ☐ Beaucoup moins vite
- ☐ Un peu moins vite
- ☐ Aussi vite
- ☐ Un peu plus vite
- ☐ Beaucoup plus vite

5.4 Lorsque la veste textile est mouillée, elle vous paraît ? (par rapport à une veste en cuir) (Cochez la case)

- ☐ Beaucoup plus lourde
- ☐ Plus lourde
- ☐ De même poids
- ☐ Plus légère
- ☐ Beaucoup plus légère

VI. POIDS

6.1 Le confort au niveau des épaules et du dos vous convient-il, en particulier lors du port de l'ARI ?

- ☐ Mauvais
- ☐ Assez confortable
- ☐ Aussi confortable
- ☐ Plus confortable
- ☐ Beaucoup plus confortable

6.2 Que pensez-vous du poids de votre veste de protection textile ? (par rapport à la veste en cuir) (Cochez la case)

- ☐ Beaucoup plus lourde
- ☐ Un peu plus lourde
- ☐ Identique
- ☐ Un peu plus légère
- ☐ Beaucoup plus légère

6.3 Le poids des EPI, y compris l'ARI paraît-il :

- ☐ Adapté
- ☐ Trop lourd

6.4 Pensez -vous que l'ajout d'une lampe individuelle, une commande en sac , une sangle de sauvetage individuelle générerait l'ergonomie et augmenterait le poids total de vos équipements individuels ?

OUI NON

VII. ERGONOMIE

7.1 Quelle tenue d'intervention vous paraît la mieux adaptée selon la température est (entourez la réponse)

	Température		
	Inférieure à 5°C	Comprise entre 5°C et 20°C	Supérieure à 20°C
Tenue textile	Oui	Oui	Oui
	Non	Non	Non
Tenue cuir	Oui	Oui	Oui
	Non	Non	Non

Expliquez vos choix

7.2 Que pensez-vous de l'ergonomie apportée avec la veste textile, c'est à dire dans l'aisance des mouvements ? (par rapport à la veste en cuir) (*Cochez la case*)

- ☐ Beaucoup moins bonne
- ☐ Assez bonne
- ☐ Aussi bonne
- ☐ Supérieure
- ☐ Très supérieure

7.3 Avez- vous été incommodé par la matière de votre nouvelle tenue ? (*Cochez la case*)

- ☐ Démangeaisons
- ☐ Rougeurs
- ☐ Odeurs
- ☐ Autres

7.4 Pensez vous qu'il faudrait améliorer le renforcement des coudes de la veste de protection textile?

OUI

NON

7.5 Pensez vous qu'il faudrait améliorer le renforcement des épaules de la veste de protection textile ?

OUI

NON

7.6 Pensez vous que le renforcement des genoux du sur-pantalon est suffisant ?

OUI

NON

7.7 Comment appréciez-vous l'enfilage et le retrait de la veste textile ? (Cochez la case)

- ☐ Très difficile
- ☐ Difficile
- ☐ Identique
- ☐ Plus facile
- ☐ Très facile

7.8 Comment appréciez-vous l'enfilage, le retrait et le port du sur-pantalon actuel ? (*Plusieurs choix possibles, cochez la ou les cases*)

Enfilage et retrait

- ☐ Très difficile par rapport à l'ancien modèle de sur-pantalon
- ☐ Difficile par rapport à l'ancien modèle de sur-pantalon
- ☐ Identique par rapport à l'ancien modèle de sur-pantalon
- ☐ Plus facile par rapport à l'ancien modèle de sur-pantalon

Très facile par rapport à l'ancien modèle de sur-pantalon

Enfilage

- ☐ Difficile parce qu'il faut enlever les bottes pour enfiler le sur-pantalon
- ☐ Facile parce qu'il n'est pas nécessaire d'enlever les bottes pour enfiler le sur-pantalon

Port

- ☐ Moins confortable ou pratique à cause de la présence de bretelles
- ☐ Agréable et efficace car les bretelles tiennent mieux les sur-pantalons
- ☐ Plus confortable et mieux adapté à chacun car il existe davantage de tailles disponibles
- ☐ Autres remarques et /ou suggestions :

7.9 Ou enflevez-vous votre cagoule, votre ensemble de protection textile et votre casque ?

- ☐ Devant votre casier à EPI
- ☐ Dans la remise à côté ou derrière de l'engin
- ☐ Dans la remise ou sur le lieu d'alerte (stade par exemple)
- ☐ Dans l'engin, avant de sortir de la remise
- ☐ Dans l'engin pendant le trajet vers le lieu d'intervention
- ☐ A côté de l'engin, arrivé sur le lieu d'intervention
- ☐ Autre lieu (précisez)

7.10 Ou fermez-vous votre veste de protection textile et bouclez-vous votre ceinturon ?

- ☐ Devant votre casier à EPI
- ☐ Dans la remise à côté ou derrière de l'engin
- ☐ Dans la remise ou sur le lieu d'alerte (stade par exemple)
- ☐ Dans l'engin, avant de sortir de la remise
- ☐ Dans l'engin pendant le trajet vers le lieu d'intervention
- ☐ A côté de l'engin, arrivé sur le lieu d'intervention

7.11 Après en avoir reçu l'ordre, quand vous équipez-vous de l'ARI ? (Cochez la case)

- ☐ Dans l'engin au cours du trajet
- ☐ En arrivant sur intervention

VIII. PENETRATION DE LA CHALEUR DANS LES EPI

8.1 Le port du ceinturon d'incendie sur la veste de protection textile vous gêne-t-il ?

OUI

NON

Si oui, dans quelles circonstances?

8.2 Préférez-vous porter le ceinturon ? (Cochez la case)

- ☐ Sous la veste de protection
- ☐ Sur la veste
- ☐ Incorporé dans la veste
- ☐ Seulement dans certaines situations (lesquelles selon vous ?)
.....
- ☐ Pas de ceinturon quelles que soient les circonstances

8.3 Sur feu, pensez-vous que le ceinturon vous apporte une protection contre les effets thermiques en empêchant l'air chaud de s'engouffrer sous la veste ?

OUI

NON

8.4 D'après-vous, les fermetures aux poignets et au cou gênent-elles au refroidissement ?

OUI

NON

8.5 Lors d'un feu, comment percevez-vous la chaleur rayonnante ? (par rapport à la veste en cuir) (Cochez la case)

- ☐ Beaucoup plus tard
- ☐ Un peu plus tard
- ☐ De façon identique
- ☐ Un peu plus tôt
- ☐ Beaucoup plus tôt

8.6 Sur un feu, immédiatement après une séance de sport, comment percevez-vous la chaleur rayonnante ? (Cochez la case)

- ☐ Beaucoup plus tard
- ☐ Un peu plus tard
- ☐ De façon identique
- ☐ Un peu plus tôt
- ☐ Beaucoup plus tôt

8.7 La cagoule vous paraît-elle comme un EPI qui génère (plusieurs choix possibles)

- ☐ Une meilleure protection lors de l'intervention pour feu
- ☐ Un risque de coup de chaleur si elle est portée intégralement dès l'enfilage des EPI
- ☐ Une meilleure protection contre le froid et le froid

IX. APPRECIATION DES EPI

9.1 Selon vous, qu'est-ce qu'un équipement de protection individuel ?

X. CONCLUSIONS

10.1 Quelle est votre impression pour les premières années ou premiers mois d'utilisation ?

(Cochez la case)

- ☐ Très mauvais
- ☐ Mauvaise
- ☐ Assez bonne
- ☐ Bonne
- ☐ Très bonne

Précisez

10.2 A quel niveau de sécurité estimez-vous évoluer avec les EPI de nouvelle génération ? (Ensemble textile, ARI mono-bouteille) (Cochez la case)

- ☐ Insuffisant
- ☐ Faible
- ☐ Normal
- ☐ Suffisant
- ☐ Elevé

10.3 Selon vous, quels équipements devraient être améliorés ?

10.4 Comment estimez- vous être protégés contre les effets thermiques ?

- ☐ Insuffisant
- ☐ Faible
- ☐ Normal
- ☐ Suffisant
- ☐ Elevé

10.5 Comment estimez-vous être informés des caractéristiques de sécurité de vos EPI ?

- ☐ Insuffisant
- ☐ Faible
- ☐ Normal
- ☐ Suffisant
- ☐ Elevé
- ☐ Très élevé

Ce questionnaire est à rendre à votre commandant d'unité.

Nous vous remercions de l'attention que vous avez accordée à ce questionnaire.

**Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Etienne**

N° d'ordre : 485 SGE

Prénom Nom : Francis JACQUES

Titre de la thèse (à rédiger en anglais): Validation and limits of performance for personal protective equipment used during fire-fighting by the Paris Fire Brigade

Spécialité (en anglais) : Science in Environmental Engineering

Mots clefs (en anglais) : personal protective equipment, physiological measurements, heat stress, human subjects tests, thermal manikin, firefighters

Résumé (en anglais) :

Changes in construction regulations and the widespread use of synthetic material in fittings for housing and professional premises have affected the experimental methods used to fight fire in enclosed and semi-enclosed spaces. Nowadays, firefighters constantly have to adapt their equipment and methods to remain effective. Consequently to dramatic accidents, the Paris Fire Brigade exploits feedback to redefine operational needs and provide fire-fighters with new protective equipment. The protective leather jacket and the two-cylinder, self-contained breathing apparatus have been replaced by a protective textile jacket and a single-cylinder breathing apparatus.

Nevertheless, the Brigade judged that compliance with relevant standards alone was insufficient in terms of guaranteeing the firefighter safety when fighting a fire and therefore carried out ergonomic tests to establish the limits of using this new equipment in comparison with the limits of the former equipment.

In compliance with the bio-ethic Huriet law, the main stages of the test protocol covered the following steps.

- a] the comparison of important properties of clothing of both types of equipments (weight, permeability, ...)
- b] Numerical simulations based on physiological load for estimating recommended fire-fighting duration
- c] Tests on heat sensing manikins to assess the fire protection afforded by the different equipments
- d] Human subject's tests performed first in a laboratory then in real conditions in a specific facility designed for fire-fighting training.

This research did reveal the new personal protective equipment increase the firefighter's general level of safety. However, the increased air capacity provided by the single air cylinder (about 1 hour) could lead to – if used to its full capacity – intense fatigue, considerable dehydration and even the risk of heat stroke, owing to longer working times and the heat constraints of fire environments. It is proposed to limit firefighting duration to 25 minutes for enclosed or semi-enclosed spaces followed by specific recuperative phase (including hydration, rest ...) if a second working time is necessary. Furthermore, this work proposes a methodology for the evaluation of personal protective equipments based also on firefighters' physiology and not only based on technical equipment features.

**Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Etienne**

N° d'ordre : 485 SGE

Prénom Nom : Jacques FRANCIS

Titre de la thèse : Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites d'emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers – Application à la lutte contre le feu par des essais sur l'Homme en conditions opérationnelles

Spécialité : Science et Génie de l'Environnement

Mots clefs : équipement de protection individuelle, mesures physiologiques, contrainte thermique, essais sur l'homme, mannequin thermique, sapeurs-pompiers

Résumé :

L'évolution des règles de construction et la généralisation des matériaux de synthèse dans les aménagements des locaux d'habitation ou professionnels ont modifié les méthodes empiriques de l'attaque du feu en espace clos ou semi-confiné. Aujourd'hui, le soldat du feu doit sans cesse adapter ses moyens et ses méthodes pour rester efficace. Durement touchée par de dramatiques accidents, la Brigade s'est appuyée sur le retour d'expérience pour redéfinir les besoins opérationnels et ainsi doter ses personnels de nouvelles protections. La veste d'intervention en cuir et l'appareil respiratoire isolant (ARI) bi-bouteilles sont remplacés par des tenues d'intervention en textile et un ARI mono bouteille.

Estimant cependant que la conformité aux référentiels normatifs ne suffisait pas à garantir la sécurité du porte lance lors de l'attaque du feu, la Brigade a réalisé des essais ergonomiques afin de définir les limites d'emploi des nouveaux équipements par comparaison avec celles des anciens.

Les bilans comparatifs des caractéristiques intrinsèques de poids et de perméabilité des deux types d'équipement, les durées estimées d'engagement du sapeur-pompier lors de l'attaque du feu obtenues par la simulation numérique et les mesures de l'évolution des comportements physiologiques du porte lance relevées d'abord en laboratoire puis lors de manœuvres d'extinction à la « maison du feu », dans le cadre de la loi « Huriet », sont les principales étapes du protocole d'essais.

Ces travaux ont montré que les évolutions et les caractéristiques techniques des protections individuelles de nouvelle génération augmentent le niveau général de sécurité du porte-lance, mais l'augmentation de l'autonomie respiratoire offerte par l'ARI mono bouteille (environ 1 heure) pourrait conduire à une fatigue intense, une déshydratation importante ou même un risque de coup de chaleur du porte-lance, dus à sa charge de travail et aux contraintes thermiques liées à l'ambiance d'un feu. Cette étude a permis de limiter à 25 minutes l'engagement du porte-lance à l'attaque du feu en espace clos ou semi-confiné et à proposer une phase de reconditionnement si un deuxième engagement s'avère nécessaire. Par ailleurs, elle a posé le cadre méthodologique de validation d'équipements de protection intégrant les caractéristiques physiologiques du sapeur-pompier et non pas seulement les possibilités techniques offertes par les équipements.