

Faculté de Médecine

Année 2024

Thèse N°

Thèse pour le diplôme d'État de docteur en Médecine

Présentée et soutenue publiquement

Le 23 avril 2024

Par Diana IONAS

**Evaluation de l'astreinte thermique des sapeurs-pompiers
de Limoges par cardiofréquencemétrie lors des
entraînements en caisson de feu.**

Thèse dirigée par le Pr Michel DRUET-CABANAC

Examineurs :

Mr le Pr Michel DRUET-CABANAC (Président)

Mr le Pr Philippe BERTIN (Juge)

Mme la Pr Nathalie DUMOITIER (Juge)

Mr le Pr Philippe NUBUKPO (Juge)

Mr le Dr Alain RICHARD (Membre invité)

Faculté de Médecine

Année 2024

Thèse N°

Thèse pour le diplôme d'État de docteur en Médecine

Présentée et soutenue publiquement

Le 23 avril 2024

Par Diana IONAS

**Evaluation de l'astreinte thermique des sapeurs-pompiers
de Limoges par cardiofréquencemétrie lors des
entraînements en caisson de feu**

Thèse dirigée par le Pr Michel DRUET-CABANAC

Examineurs :

Mr le Pr Michel DRUET-CABANAC (Président)

Mr le Pr Philippe BERTIN (Juge)

Mme la Pr Nathalie DUMOITIER (Juge)

Mr le Pr Philippe NUBUKPO (Juge)

Mr le Dr Alain RICHARD (Membre invité)

Le 25 janvier 2023

Doyen de la Faculté

Monsieur le Professeur **Pierre-Yves ROBERT**

Assesseurs

Madame le Professeur **Marie-Cécile PLOY**

Monsieur le Professeur **Jacques MONTEIL**

Monsieur le Professeur **Laurent FOURCADE**

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

ABOYANS Victor	CARDIOLOGIE
ACHARD Jean-Michel	PHYSIOLOGIE
AJZENBERG Daniel	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE
ALAIN Sophie	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE
AUBARD Yves	GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE
AUBRY Karine	O.R.L.
BALLOUHEY Quentin	CHIRURGIE INFANTILE
BERTIN Philippe	THERAPEUTIQUE
BOURTHOUMIEU Sylvie	CYTOLOGIE ET HISTOLOGIE
CAIRE François	NEUROCHIRURGIE
CHRISTOU Niki	CHIRURGIE VISCERALE ET DIGESTIVE
CLAVERE Pierre	RADIOTHERAPIE
CLEMENT Jean-Pierre	PSYCHIATRIE D'ADULTES
CORNU Elisabeth	CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE
COURATIER Philippe	NEUROLOGIE
DAVIET Jean-Christophe	MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION

DESCAZEAUD Aurélien	UROLOGIE
DRUET-CABANAC Michel	MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL
DURAND Karine	BIOLOGIE CELLULAIRE
DURAND-FONTANIER Sylvaine	ANATOMIE (CHIRURGIE DIGESTIVE)
FAUCHAIS Anne-Laure	MEDECINE INTERNE
FAUCHER Jean-François	MALADIES INFECTIEUSES
FAVREAU Frédéric	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
FEUILLARD Jean	HEMATOLOGIE
FOURCADE Laurent	CHIRURGIE INFANTILE
GAUTHIER Tristan	GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE
GUIGONIS Vincent	PEDIATRIE
HANTZ Sébastien	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE
HOUETO Jean-Luc	NEUROLOGIE
JACCARD Arnaud	HEMATOLOGIE
JACQUES Jérémie	GASTRO-ENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE
JAUBERTEAU-MARCHAN M. Odile	IMMUNOLOGIE
JESUS Pierre	NUTRITION
JOUAN Jérôme	CHIRURGIE THORACIQUE ET VASCULAIRE
LABROUSSE François	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES
LACROIX Philippe	MEDECINE VASCULAIRE
LAROCHE Marie-Laure	PHARMACOLOGIE CLINIQUE
LOUSTAUD-RATTI Véronique	HEPATOLOGIE
LY Kim	MEDECINE INTERNE
MAGNE Julien	EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION
MAGY Laurent	NEUROLOGIE
MARCHEIX Pierre-Sylvain	CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE

MARQUET Pierre	PHARMACOLOGIE FONDAMENTALE
MATHONNET Muriel	CHIRURGIE DIGESTIVE
MELLONI Boris	PNEUMOLOGIE
MOHTY Dania	CARDIOLOGIE
MONTEIL Jacques	BIOPHYSIQUE ET MEDECINE NUCLEAIRE
MOUNAYER Charbel	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE
NUBUKPO Philippe	ADDICTOLOGIE
OLLIAC Bertrand	PEDOPSYCHIATRIE
PARAF François	MEDECINE LEGALE ET DROIT DE LA SANTE
PLOY Marie-Cécile	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE
PREUX Pierre-Marie	EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION
ROBERT Pierre-Yves	OPHTALMOLOGIE
ROUCHAUD Aymeric	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE
SALLE Jean-Yves	MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION
STURTZ Franck	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
TCHALLA Achille	GERIATRIE ET BIOLOGIE DU VIEILLISSEMENT
TEISSIER-CLEMENT Marie-Pierre	ENDOCRINOLOGIE, DIABETE ET MALADIES METABOLIQUES
TOURE Fatouma	NEPHROLOGIE
VALLEIX Denis	ANATOMIE
VERGNENEGRE Alain	EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION
VERGNE-SALLE Pascale	THERAPEUTIQUE
VIGNON Philippe	REANIMATION
VINCENT François	PHYSIOLOGIE
YARDIN Catherine	CYTOLOGIE ET HISTOLOGIE

Professeurs Associés des Universités à mi-temps des disciplines médicales

BRIE Joël	CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE ET STOMATOLOGIE
KARAM Henri-Hani	MEDECINE D'URGENCE
MOREAU Stéphane	EPIDEMIOLOGIE CLINIQUE

Maitres de Conférences des Universités – Praticiens Hospitaliers

COMPAGNAT Maxence	MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION
COUVE-DEACON Elodie	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE
DELUCHE Elise	CANCEROLOGIE
DUCHESNE Mathilde	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES
ESCLAIRE Françoise	BIOLOGIE CELLULAIRE
FAYE Pierre-Antoine	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
FREDON Fabien	ANATOMIE/CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE
LALOZE Jérôme	CHIRURGIE PLASTIQUE
LE GUYADER Alexandre	CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE
LIA Anne-Sophie	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
PASCAL Virginie	IMMUNOLOGIE
RIZZO David	HEMATOLOGIE
SALLE Henri	NEUROCHIRURGIE
SALLE Laurence	ENDOCRINOLOGIE
TERRO Faraj	BIOLOGIE CELLULAIRE
WOILLARD Jean-Baptiste	PHARMACOLOGIE FONDAMENTALE
YERA Hélène	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE (mission temporaire)

P.R.A.G.

GAUTIER Sylvie	ANGLAIS
-----------------------	---------

Maitre de Conférences des Universités associé à mi-temps

BELONI Pascale

SCIENCES INFIRMIERES

Professeur des Universités de Médecine Générale

DUMOITIER Nathalie

(Responsable du département de Médecine Générale)

Professeur associé des Universités à mi-temps de Médecine Générale

HOUDARD Gaëtan

(du 01-09-2019 au 31-08-2025)

Maitres de Conférences associés à mi-temps de médecine générale

BUREAU-YNIESTA Coralie

(du 01-09-2022 au 31-08-2025)

LAUCHET Nadège

(du 01-09-2020 au 31-08-2023)

SEVE Léa

(du 01-09-2021 au 31-08-2024)

Professeurs Emérites

ADENIS Jean-Paul

du 01-09-2017 au 31-08-2021

ALDIGIER Jean-Claude

du 01-09-2018 au 31-08-2022

BESSEDE Jean-Pierre

du 01-09-2018 au 31-08-2022

BUCHON Daniel

du 01-09-2019 au 31-08-2022

DARDE Marie-Laure

du 01-09-2021 au 31-08-2023

DESSPORT Jean-Claude

du 01-09-2020 au 31-08-2022

MABIT Christian

du 01-09-2022 au 31-08-2024

MERLE Louis

du 01-09-2017 au 31-08-2022

MOREAU Jean-Jacques

du 01-09-2019 au 31-08-2023

NATHAN-DENIZOT Nathalie

du 01-09-2022 au 31-08-2024

TREVES Richard

du 01-09-2021 au 31-08-2023

TUBIANA-MATHIEU Nicole

du 01-09-2018 au 31-08-2021

VALLAT Jean-Michel

du 01-09-2019 au 31.08.2023

VIROT Patrice

du 01-09-2021 au 31-08-2023

Remerciements

A Monsieur le Professeur DRUET-CABANAC

Merci pour votre implication active et sans cesse à la réalisation de cette thèse, pour tout ce que vous m'avez appris durant ces années et pour votre patience.

A Monsieur le Docteur RICHARD

Merci de m'avoir confié le sujet de cette thèse et de m'avoir fait découvrir le monde des sapeurs-pompiers.

A Madame le Professeur DUMOITIER

Merci de m'avoir accompagné dans mes premiers pas en France. Merci d'avoir accepté de juger cette thèse.

A Monsieur le Professeur BERTIN

Merci de m'avoir fait aimer la rhumatologie. Merci d'avoir accepté de juger ce travail.

A Monsieur le Professeur NUBUKPO

Merci d'avoir accepté de juger ce travail.

A Monsieur le Docteur DAL COL

Merci pour votre accueil bienveillant dans votre cabinet, vous avez été mon point de départ dans la vie de futur médecin. Merci Martine pour votre générosité, votre douceur et pour les plats délicieux.

A Monsieur le Docteur HEYMES

Merci de m'avoir appris les subtilités de la Médecine du Travail. C'est un plaisir d'apprendre et de travailler avec toi.

A mes chers co-internes, qui m'ont tant embelli cette période qu'est l'internat.

A mes amis Oana et Robert, pour leur générosité et leur gentillesse.

A mon amie Ingrid, pour sa bonne humeur permanente, les conseils et le soutien.

A mes parents, pour leur soutien inconditionnel.

A mon chéri Antoine, pour sa patience et sa douceur durant la période de préparation de ce travail.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Liste des abréviations

ARI : Appareil Respiratoire Insolant
AVC : Accident vasculaire cérébral
BPM : Battements par minute
BMPM : Bataillon de marins-pompiers de Marseille
BSPP : Bataillon des Sapeur-Pompiers de Paris
CCA : Coût cardiaque absolu
CCR : Coût cardiaque relatif
°C : degré Celcius
CFM : Cardiofréquencemétrie
Clo : clothes
CMIC : Cellules mobiles d'intervention chimique
CMIR : Cellules mobiles d'intervention radiologique
CODIS : Centre Opérationnel Départemental d'Incendie et de Secours
CPI : Centre de première intervention
CS : Centre de secours
CTA : Centre de Traitement de l'Alerte
DLE : Durée limite d'exposition
EPCT : Extra pulsations cardiaques thermiques
EPI : Equipement de protection individuel
FC : Fréquence cardiaque
FCMT : Fréquence cardiaque maximale théorique
FCo : Fréquence cardiaque de repos
FCr : Fréquence cardiaque de réserve
FORMSIC : Formations Militaires de la Sécurité Civile
HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HR : Humidité relative de l'air
J : Joule
Icl : Isolation thermique du vêtement
IDM : Infarctus du myocarde
INRS : Institut national de recherche et de sécurité
PHS : Astreinte thermique prévisible ou Predicted heat strain
RSST : Règlement en santé et sécurité du travail

SDIS : Service Départemental d'Incendie et Secours

SP : Sapeur-pompier

SPP : Sapeur-pompier Professionnel

SPV : Sapeur-pompier Volontaire

SSSM : Service de Santé et de Secours Médical

Ta : Température de l'air

Tg : Température du globe noir

Thn : Température humide naturelle

Va : Vitesse de l'air

WBGT : Wet Bulb Globe Temperature

Table des matières

Remerciements	10
Droits d'auteurs	12
Liste des abréviations	13
Table des matières	15
Listes des figures	18
Liste des photographies	19
Liste des tableaux	20
Introduction	21
I. Contexte.....	22
I.1. Le métier de sapeur-pompier	22
I.1.1. Histoire du métier	22
I.1.2. Les effectifs en quelques chiffres	22
I.1.3. Statuts des sapeurs-pompiers.....	22
I.1.3.1. Sapeurs-pompiers professionnels (SPP).....	23
I.1.3.2. Sapeurs-pompiers volontaires (SPV)	23
I.1.3.3. Sapeurs-pompiers militaires.....	23
I.1.4. Missions des Sapeurs-pompiers de France.....	24
I.1.5. Activité des Sapeurs-pompiers en France	24
I.1.6. Répartition des missions par nature de l'intervention	25
I.1.7. Organisation des SDIS en France	25
I.1.8. Au niveau des communes	26
I.1.9. Au niveau du département	26
I.2. Présentation du SDIS 87	27
I.2.1. Organisation du SDIS 87.....	27
I.2.2. L'effectif du SDIS 87	27
I.2.3. Secteurs du SDIS 87.....	28
I.3. L'aptitude médicale des sapeurs-pompiers	28
I.3.1. Types de visites médicales chez les sapeurs-pompiers	28
I.3.1.1. La visite de recrutement.....	28
I.3.1.2. La visite de maintien dans l'activité	28
I.3.1.3. La visite de reprise	28
I.3.1.4. La visite de reprise après congé maternité	29
I.3.1.5. La visite à la demande	29
I.3.1.6. La visite de pré-reprise.....	29
I.4. Exposition professionnelle chez les Sapeurs-Pompiers.....	29
I.4.1. Définition des notions de risque et danger.....	29
I.4.2. Voies d'exposition	30
I.4.3. Les agents biologiques.....	30
I.4.4. Les agents chimiques.....	30
I.4.4.1. Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	30
I.4.4.2. L'amiante	31
I.4.5. Les contraintes psychosociales et organisationnelles.....	31
I.4.6. Les contraintes physiques	31

I.5.	La lutte contre l'incendie et l'effet thermique	31
I.5.1.	Les notions de chaleur et température	32
I.5.2.	La thermorégulation	32
I.5.3.	La thermogenèse	33
I.5.4.	La thermolyse	33
I.5.4.1.	La conduction.....	34
I.5.4.2.	La convection.....	34
I.5.4.3.	Le rayonnement.....	34
I.5.4.4.	L'évaporation.....	34
I.5.4.5.	La respiration.....	34
I.5.5.	Le confort thermique	35
I.5.6.	L'équilibre thermique.....	35
I.5.7.	Le stress thermique.....	36
I.5.8.	Facteurs influençant le stress thermique	36
I.5.8.1.	L'activité physique	36
I.5.8.2.	L'habillement	36
I.5.8.3.	Les caractéristiques de l'environnement	36
I.5.9.	Paramètres physiologiques influençant la thermorégulation	37
I.5.9.1.	La condition physique.....	37
I.5.9.2.	L'âge	37
I.5.9.3.	Le genre.....	38
I.5.9.4.	Le rythme nyctéméral.....	38
I.5.9.5.	L'acclimatation	38
I.6.	Travail en ambiances thermiques.....	38
I.6.1.	Effets de la chaleur sur la santé	39
I.6.2.	Facteurs qui peuvent aggraver le travail à la chaleur	40
I.7.	Contrainte et astreinte	40
I.7.1.	Les paramètres de la contrainte thermique	40
I.7.1.1.	L'humidité relative de l'air	41
I.7.1.2.	La vitesse de l'air.....	41
I.7.1.3.	La température sèche de l'air	41
I.7.1.4.	La température moyenne de rayonnement.....	41
I.7.2.	Mesure de la contrainte thermique	41
I.7.2.1.	L'indice WBGT	41
I.7.2.2.	L'indice de sudation requise.....	43
I.7.3.	Règlementation pour le travail à la chaleur.....	44
I.8.	L'évaluation de l'astreinte thermique par cardiofréquencemétrie	44
I.8.1.	Adaptation cardiaque à l'effort	44
I.8.2.	Facteurs de variation de la fréquence cardiaque	45
I.8.3.	Principes de la cardiofréquencemétrie	45
I.8.3.1.	La méthode des coûts cardiaques.....	46
I.8.3.1.1.	La fréquence cardiaque de référence.....	46
I.8.3.1.2.	La fréquence cardiaque moyenne de travail.....	46
I.8.3.1.3.	La fréquence cardiaque de récupération	46
I.8.3.1.4.	Le coût cardiaque absolu moyen	47
I.8.3.1.5.	Le cout coût cardiaque relatif moyen.....	47
I.8.3.1.6.	La fréquence cardiaque de crête sur une phase de travail	47
I.8.3.2.	Grilles de pénibilité.....	47

I.9.	L`entrainement en caisson de feu	47
II.	Objectifs	50
II.1.	Objectif principal.....	50
II.2.	Objectifs secondaires	50
III.	Matériels et méthodes.....	51
III.1.	Population étudiée.....	51
III.2.	Déroulement de l`étude	51
III.2.1.	La phase d`avant le brûlage.....	51
III.2.2.	La phase d`après le brûlage.....	54
III.3.	Le questionnaire (annexe 1).....	54
III.3.1.	Variables mesurées	55
III.3.1.1.	Fréquences cardiaques.....	55
III.3.1.2.	Température centrale	56
III.3.1.3.	Autres mesures	56
IV.	Résultats.....	57
IV.1.	Caractéristiques des sapeurs-pompiers étudiés	57
IV.1.1.	Données socio-professionnelles.....	57
IV.1.2.	Données cliniques	57
IV.1.3.	Données concernant l`expérience en caisson de feu	57
IV.1.4.	Données concernant la condition physique	57
IV.1.5.	Données subjectives concernant l`ambiance dans le caisson	58
IV.2.	Mesure de l`astreinte thermique.....	58
IV.2.1.	La perte hydrique	58
IV.2.2.	La variation de la température centrale	58
IV.2.3.	La variation de la fréquence cardiaque.....	58
IV.2.4.	La fréquence cardiaque de récupération	59
IV.3.	Indices de pénibilité au travail.....	59
IV.3.1.	Calcul du coût cardiaque.....	59
IV.3.2.	Calcul des EPCT.....	59
IV.3.3.	Calcul du score de pénibilité globale selon la grille CHAMOUX.....	59
IV.4.	Analyse des données en fonction du poste occupé pendant le brûlage	60
IV.5.	Exemple d`analyse par poste pour un même SP par Polar Team ©.....	61
V.	Discussions.....	64
V.1.	Principaux résultats	64
V.2.	Limites de l`étude	64
V.3.	Justification des mesures	65
V.4.	Température.....	67
V.5.	Perte hydrique.....	67
V.6.	Fréquence cardiaque	67
V.7.	Indices de pénibilité cardiaque	68
V.8.	L`acclimatation à la chaleur	68
	Conclusion	69
	Références bibliographiques	70

Listes des figures

Figure 1. Lutte contre un incendie au Moyen Age.....20

Figure 2. Répartition du nombre d'opérations des sapeurs-pompiers par catégories 22

Figure 1 : Les couches thermiques chez l'homme

Figure 2 : Le bilan thermique

Figure 3 : Comportement des couches thermiques en fonction des l'ambiance extérieure

Figure 4 : L'équipement de protection contre le feu

Figure 5 : Globe noir

Figure 6 : Température WBGT estimée à partir de l'humidité relative

Figure 9 : Schéma des étapes de l'étude

Figure 10 : Pénibilité globale des postes selon la Grille CHAMOIX

Figure 11 : Analyse Polar Team au poste F1 « Porte »

Figure 12 : Analyse Polar Team au poste F2 « Entrée »

Figure 13 : Analyse Polar Team au poste F3 « Observateur »

Liste des photographies

Photographie 1 : Le nouveau caisson du SDIS 87

Photographie 2 : Fumées de pyrolyse

Photographie 3 : Cardiofréquencemètre Ceinture Polar H10

Photographie 4 : Intérieur du caisson en début de brulage

Liste des tableaux

Tableau 1 : Régimes d'alternance travail/repos en fonction de la T° WBGT

Tableau 2 : Régimes d'alternance travail/repos en fonction de la T° WBGT et de l'acclimatation

Tableau 3 : Analyse des paramètres par postes dans le caisson

Introduction

Les sapeurs-pompiers (SP) sont confrontés, dans le cadre de leurs opérations, à une multitude de situations dangereuses les exposant à des risques pour leur santé et leur intégrité physique. Parmi leurs missions, la lutte contre les incendies est la plus connue et emblématique et les distingue des autres services de secours. En 2021, 25% des causes de décès en opération étaient liées à une intervention de lutte contre le feu.

La mission de lutte contre les incendies implique une activité physique intense réalisée dans des conditions environnementales extrêmes, qui modifient les paramètres du corps. Afin de se protéger dans ces conditions hostiles, les SP utilisent un équipement de protection individuel relativement lourd qui rajoute une charge physique additionnelle. Les contraintes physiologiques dues au stress thermique et à l'effort physique important, associées aux vêtements de protection qui préservent la température du corps sont des facteurs qui exposent les SP aux accidents liés aux ambiances thermiques chaudes. Le stress thermique est le premier facteur limitant la durée des missions d'incendie, plus que la qualité de l'air ou l'inhalation de fumées.

Il apparaît important de pouvoir évaluer le niveau de l'astreinte cardiaque lors des interventions en ambiance thermique chaude (incendie), afin d'y mobiliser des SP présentant des profils cardiovasculaires adaptés sans risque pour leur santé. En conditions d'incendie, il est difficile de réaliser des mesures pour déterminer le niveau de l'astreinte physiologique. Les entraînements en caisson de feu permettent la reproduction de ces conditions et des phénomènes thermiques auxquels les SP peuvent être confrontés lors des incendies.

A notre connaissance, à ce jour, il n'existe pas d'informations sur le profil cardiovasculaire nécessaire pour un sapeur-pompier pour assurer une mission incendie sans s'exposer à des risques trop importants pour sa santé, ni de limite d'exposition dans le temps bien définie.

L'objectif de notre travail était d'évaluer, au cours des entraînements en caisson de feu, l'astreinte physiologique induite par la chaleur chez des SP professionnels (SPP) et volontaires (SPV) de Limoges.

I. Contexte

I.1. Le métier de sapeur-pompier

I.1.1. Histoire du métier

L'homme a toujours été confronté aux effets dévastateurs du feu. Le métier de sapeur-pompier existe depuis le moyen Age, lorsque la population se mobilisait spontanément et volontairement pour aider à l'extinction des feux. Ainsi, les habitants des villes exerçaient dès cette époque des fonctions pour se protéger des feux d'habitations (qui étaient majoritairement en bois) en s'organisant en tours de garde, jour et nuit. Les villes ne bénéficiant pas de réseau de distribution d'eau, en cas de d'incendie, les secours abattaient tout ce qu'il y avait autour du feu, pour diminuer sa propagation. Les habitants "sapaient" les flammes. (1)



Figure 7 : Lutte contre un incendie au Moyen Age (Source : internet)

I.1.2. Les effectifs en quelques chiffres

Au 31 décembre 2023, on comptait 254 800 sapeurs-pompiers en France, dont 43 000 SPP (17%), 198 800 SPV (78%) et 13 000 militaires (5%). Les femmes représentaient 21% des sapeurs-pompiers civils. Les jeunes sapeurs-pompiers étaient au nombre de 28 800 (Ministère de l'Intérieur, décembre 2023).

I.1.3. Statuts des sapeurs-pompiers

En France, il existe 4 statuts de sapeurs-pompiers, relevant du service public : (2)

I.1.3.1. Sapeurs-pompiers professionnels (SPP)

Fonctionnaires territoriaux, ils relèvent des services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) ; leurs droits et obligations sont définis par le Code de la sécurité intérieure et ils sont recrutés sur concours.

I.1.3.2. Sapeurs-pompiers volontaires (SPV)

En France plus de 196 000 hommes et femmes vivent un engagement quotidien au service des autres, en parallèle de leur métier ou de leurs études, en devenant SPV (ministère de l'Intérieur). Selon l'article R.1424-1 du code général des collectivités territoriales, chaque SDIS peut fixer les obligations de service de ses SPV dans son département. La société ne fait pas de distinction entre le statut des différents sapeurs-pompiers puisque les SPV doivent avoir la capacité de réaliser les mêmes missions que les SPP. (3)

Conditions nécessaires pour devenir SPV :

- a. Avoir minimum 16 ans,
- b. Résider légalement en France,
- c. Jouir de ses droits civiques,
- d. Absence de condamnation incompatible avec l'exercice des fonctions,
- e. Remplir les conditions d'aptitude médicale et physique.

I.1.3.3. Sapeurs-pompiers militaires

Militaires relevant du Ministère des Armées, ces sapeurs peuvent être affectés dans l'un des 3 corps :

- La Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP), unité de l'Armée de Terre, sous l'autorité du préfet de police, ayant comme mission la défense de la ville de Paris et des départements des Hauts de Seine, Val de Marne et Seine Saint Denis,
- Le Bataillon de marins-pompiers de Marseille (BMPM), unité de la Marine Nationale, sous l'autorité du maire de Marseille, défend la ville de Marseille, le port et l'aéroport de Marseille,
- Les Formations Militaires de la Sécurité Civile (Formsic), sont des sapeurs-sauveteurs hautement qualifiés, relevant des unités de l'Armée de Terre qui appartiennent à l'arme du Génie. Ils agissent en cas d'urgence en renfort des sapeurs-pompiers et des forces de police.

I.1.4. Missions des Sapeurs-pompiers de France

Qu'ils soient professionnels, volontaires, ou militaires, les SP veillent sur la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement, grâce à leurs interventions complexes et diverses. Leurs missions et leurs conditions d'exercice ont beaucoup évolué au fil du temps, se recentrant aujourd'hui principalement sur le secours à la personne :

- Secours à domicile en cas d'accident domestique (chutes, brûlures, asphyxies, électrocutions, ...),
- Secours à la personne en cas d'accident physiologique (malaise, arrêt cardiaque, détresse psychologique, ...),
- Secours sur la voie publique (victimes des accidents de la route, ...).

Certains SP possèdent des spécialités ou des capacités transversales dans un domaine précis, en fonction du milieu opérationnel (la spéléologie, l'alpinisme, la plongée, ...) ou bien se former à des actions spécifiques comme la recherche des personnes disparues pour les agents cynotechniques (maîtres chien), groupe montagne, désincarcération ferroviaire ou lors de catastrophes naturelles.

Les SP sont également concernés par la question de l'écologie, de la pollution et des risques industriels. Dans certaines situations, ils utilisent le brulage dirigé pour prévenir la propagation des feux. Il existe également des SP formés dans le domaine des risques chimiques et radiologiques, qui agissent en cas de situation accidentelle ou d'attentat. Le personnel ayant cette spécialisation intervient dans le cadre des Cellules mobiles d'intervention chimique (CMIC) et des Cellules mobiles d'intervention radiologique (CMIR). Un exemple d'intervention pour « risque chimique » à Limoges en 1998, a été lorsqu'une société stockant des produits chimiques a déversé, de façon accidentelle, une quantité massive d'acide concentré. La situation a été contrôlée grâce à l'intervention des SP, accompagnés par leur pharmacien sapeur-pompier qui détenait les connaissances nécessaires pour maîtriser ce produit.

I.1.5. Activité des Sapeurs-pompiers en France

Les attributions des SP diffèrent en fonction de leur statut (professionnels ou volontaires), de leur grade (hommes de rang, sous-officiers ou officiers), de leur ancienneté et leur milieu d'exercice (rural ou urbain). Ainsi, les officiers assurent la coordination et l'organisation des opérations en dehors et sur le terrain, l'encadrement du personnel est placé sous leur autorité (les sous-officiers) aussi que la gestion et le contrôle des systèmes de sécurité des sites. Les sous-officiers appliquent les directives des officiers aux hommes de rang. Les SPV volontaires participent à l'ensemble des interventions de sécurité civile sur leur temps libre, en plus de leur profession principale, grâce à leur engagement citoyen.

I.1.6. Répartition des missions par nature de l'intervention

En 2023, les SP ont effectué 4 968 500 interventions dont 286 600 pour des incendies, 4 284 900 pour secours d'urgence aux personnes, dont 299 500 accidents de circulation, 53 500 pour des risques technologiques, 343 500 pour des opérations diverses. La répartition de ces missions est présentée figure 2.

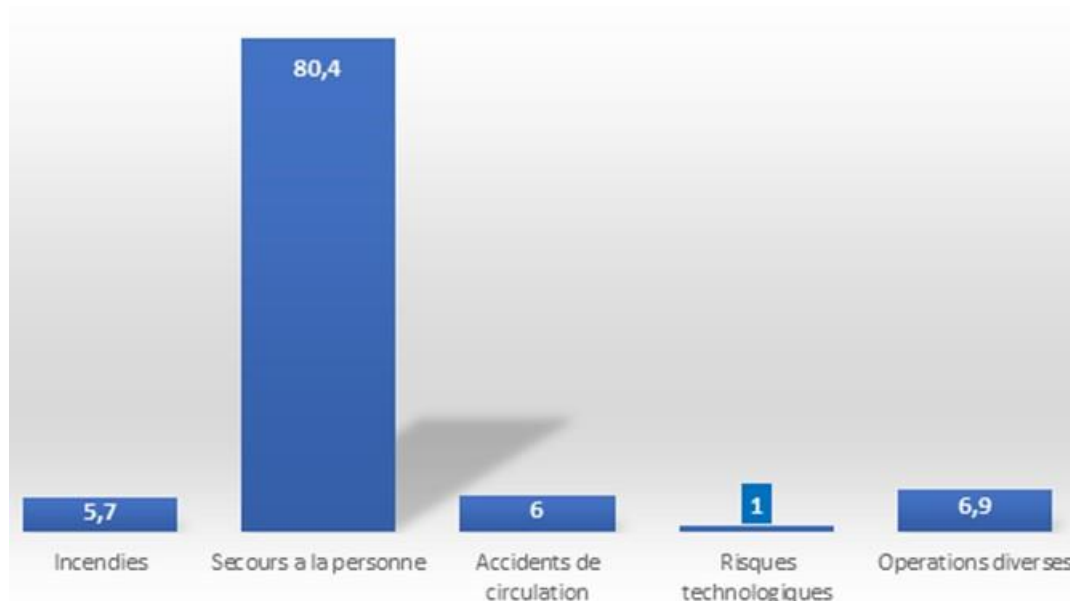


Figure 8 : Répartition des missions par nature de l'intervention (Source : Ministère de l'Intérieur, 2023)

I.1.7. Organisation des SDIS en France

En France, le système de secours d'urgence et de protection des citoyens ressort de la politique publique de sécurité civile. Issue d'une compétence commune entre l'Etat et les collectivités locales, la mission de secours d'urgence est assurée principalement par les SP regroupés dans des services départementaux d'incendie et de secours (SDIS), auxquels se rajoute des corps communaux et intercommunaux, ainsi que des unités militaires (Brigade de sapeurs-pompiers de Paris et Bataillon des marins-pompiers de Marseille). En cas de fort besoin, ce dispositif est complété par les moyens nationaux de la sécurité civile du Ministère de l'Intérieur (avions bombardiers d'eau, hélicoptères, démineurs et par la réquisition des réserves communales de sécurité civile, ou des moyens privés). (1) (2)

I.1.8. Au niveau des communes

La sécurité des populations dans la commune, la responsabilité revenant au Maire de la commune, est assurée par les centres de secours (CS) qui peuvent défendre, en fonction de la taille de la commune plusieurs centres de première intervention (CPI), situées dans les communes voisines, plus petits. Les CS ont la capacité d'assurer, en cas de besoin, à la fois au moins un départ en opération contre l'incendie par exemple, et une intervention de secours d'urgence à la personne ou autre type de mission, tandis que les CPI peuvent assurer généralement un départ en intervention.

Chaque centre d'incendie et de secours se compose, en fonction de sa taille, d'un effectif suffisant pour assurer la garde et les départs en intervention. Le personnel de garde est susceptible de partir immédiatement en intervention, et celui d'astreinte dans un délai défini par le règlement opérationnel. (4) (5)

I.1.9. Au niveau du département

La gestion et l'organisation de l'activité des différents centres de sapeurs-pompier de chaque département est assurée par les SDIS. Ils ont comme mission d'étudier les risques et de mobiliser les moyens de secours nécessaires et adaptés en fonction de la nature de l'intervention, grâce à leur Centre de Traitement de l'Alerte (CTA). Le CTA a comme rôle d'assurer, 24h/24, la réception des appels au 18 et au 112, de traiter les alertes et d'engager les SP en fonction de la nature de l'appel. Il sollicite également, en cas de besoin, le CODIS (Centre Opérationnel Départemental d'Incendie et de Secours), qui intervient lors des interventions spécifiques ou en cas de besoin de renfort en opération.

Les SDIS sont dirigés par un officier supérieur de SP, sous l'autorité du préfet, pour la gestion opérationnelle et du Conseil d'administration (gestion financière et administrative). Le Conseil d'Administration est composé par des représentants du département, des communes et d'établissements publics, compétents en matière de secours et des représentants sapeurs-pompier. Il s'appuie sur la voix consultative de la Commission administrative et technique, composée par des représentants des sapeurs-pompier professionnels et volontaires, du médecin-chef du Service de Santé et de Secours Médical (SSSM), et d'un représentant des autres fonctionnaires territoriaux du SDIS.

Le règlement opérationnel, fixé par le préfet, détermine, après avis du comité technique départemental, de la commission administrative et technique du service d'incendie et de secours et du conseil d'administration, les consignes opérationnelles adaptés pour chaque intervention (effectif minimum et le matériel nécessaire).

Par conséquent :

- La mission de lutte contre l'incendie exige au moins un engin pompe-tonne et 6 à 8 SP,
- L'opération de secours d'urgence aux populations nécessite un véhicule de secours aux asphyxies ou blessés et 3 sapeurs-pompier,
- Pour les autres interventions, les outils adaptés doivent être déclenchés par 2 SP.

I.2. Présentation du SDIS 87

I.2.1. Organisation du SDIS 87

Le Service départemental d'incendie et secours de la Haute-Vienne (SDIS 87) est un service départemental public autonome sous l'autorité du président du Conseil d'Administration sur le plan administratif et sous l'autorité du préfet de la Haute-Vienne sur le plan opérationnel.

Pour assurer la direction de l'établissement et la gestion administrative, technique, opérationnelle et financière du SDIS 87, le Directeur Départemental dispose d'un binôme de direction composé du Directeur et du Directeur Adjoint, de 4 pôles fonctionnels et d'une sous-direction de santé :

- Le Pôle Opérationnel, qui dispose de deux groupements : Prévention et Opérations (CTA CODIS),
- Le Pôle Ressources, composé de 2 structures : Formation / Sport et Gestion Emploi Activités Compétences, et du service Qualité de vie en Activité,
- Le Pôle Moyens Généraux, composé de 3 structures : Finance, Administration et Logistique,
- Le Pôle Territorial, composé de deux groupements : Territorial et Appui Territorial,
- Le Service de Santé et de Secours Médical (SSSM) est chargé de l'aptitude médicale des sapeurs-pompier professionnels et volontaires, ainsi que du soutien sanitaire et des soins d'urgence des sapeurs-pompier lors de missions particulières.

I.2.2. L'effectif du SDIS 87

Le SDIS 87 comptait en 2023, 210 SPP dont 92% hommes, 836 SPV dont 71% hommes, 95 membres de la sous-direction SSSM et 55 personnels administratifs et techniques spécialisés. (5)

I.2.3. Secteurs du SDIS 87

Le SDIS 87 compte 5 secteurs et 30 centres de secours. Le secteur de Limoges compte 3 casernes : Mitout, Mauvandiere et Beaubreuil.

I.3. L`aptitude médicale des sapeurs-pompiers

Les visites médicales d`aptitudes sont réalisées par les infirmières et les médecins du service de santé et sécurité médicale (SSSM) de chaque SDIS. Les conditions d`aptitude sont communes aux SPP et SPV et elles sont élaborées à l`aide de l`arrête du 1er octobre 2003 qui est un outil utilise par les militaires, conçu pour déterminer un profil médical individuel (SYGICOP).

A chaque sigle du profil SYGICOP il est attribué un coefficient de 0 à 6 :

- **S** : correspond aux membres supérieurs et à la ceinture scapulaire,
- **I** : correspond aux membres inférieurs et à la ceinture pelvienne,
- **G** : correspond à l`état général,
- **Y** : correspond à la vision,
- **C** : correspond au sens chromatique,
- **O** : correspond à l`audition,
- **P** : correspond au psychisme.

Les missions auxquelles les sapeurs-pompiers peuvent être considérés aptes sont confiées en fonction de l`âge et du profil médical du SP. Il existe 5 types de profils SIGYCOP notées de A à E.

I.3.1. Types de visites médicales chez les sapeurs-pompiers

I.3.1.1. La visite de recrutement

Un candidat peut être déclaré apte à exercer les missions de SPP ou SPV s`il remplit les critères médicaux correspondant au minimum au profil B.

I.3.1.2. La visite de maintien dans l`activité

La périodicité des visites médicales chez les sapeurs-pompiers professionnels et volontaires est annuelle, pouvant être portée à deux ans pour les SP âgés de 16 à 38 ans.

I.3.1.3. La visite de reprise

Elle est organisée après tout arrêt de travail supérieur à 21 jours.

I.3.1.4. La visite de reprise après congé maternité

Cette visite est obligatoire pour la reprise de l'activité opérationnelle puisque la grossesse entraîne une inaptitude opérationnelle temporaire.

I.3.1.5. La visite à la demande

Ce type de visite peut être sollicité à tout moment à la demande du SP, de la Direction, ou du médecin du SSSM.

I.3.1.6. La visite de pré-reprise

Cette visite est organisée lorsque l'agent est en arrêt de travail et elle a pour objectif d'organiser le retour dans l'emploi et d'anticiper les éventuels aménagements de poste.

I.4. Exposition professionnelle chez les Sapeurs-Pompiers

I.4.1. Définition des notions de risque et danger

Le danger est « la capacité intrinsèque d'un agent ou d'une situation à provoquer des effets néfastes sur une cible telle que les personnes, l'environnement ». Un risque est défini comme « la probabilité qu'un événement dommageable se produise ».

Les sapeurs-pompiers sont soumis à de nombreux risques durant toute leur carrière. L'exposition à la souffrance humaine, aux milieux extrêmes, aux horaires atypiques et les exigences physiques rendent la profession de sapeur-pompier contraignante et pleines d'imprévues. Une bonne condition physique, une capacité mentale à faire face à des situations dangereuses et enfin une résilience, un courage, l'exemplarité et l'esprit de sacrifice sont des conditions essentielles à la pratique de ce métier. L'article L723-1 dans le cadre de la loi de la Sécurité Civile reconnaît le caractère dangereux du métier et des missions exercées par les sapeurs-pompiers.

L'exposition professionnelle chez les SP est complexe et comprend un mélange hétérogène de plusieurs catégories de risques. Les SP sont sollicités à intervenir dans de nombreuses situations, plus ou moins dangereuses, et sont soumis également à des contraintes psychosociales et organisationnelles. Dans ce contexte, ils bénéficient régulièrement de visites médicales, des formations et des mises au point des protocoles opérationnels.

Les principales catégories de risques auxquels les SP sont exposés sont :

- Les risques chimiques,
- Les risques biologiques,
- Les risques physiques,
- Le risque psychosocial,

I.4.2. Voies d'exposition

Les voies d'exposition professionnelle des SP aux agents chimiques et biologiques sont la voie respiratoire (inhalation), digestive (ingestion) et cutanée. (6) Une attention particulière est accordée à l'exposition lors des missions de lutte contre les incendies, qui se déroulent en 2 étapes :

- La lutte active, étape lors de laquelle il est réalisé l'extinction et la maîtrise du feu,
- Le déblaiement, étape de nettoyage, une fois que le feu est éteint.

Lors de la phase d'extinction, le risque chimique est maximal notamment par l'inhalation des fumées d'incendie. En ce qui concerne la voie digestive, l'exposition se fera par ingestion de suies en cas de contact mains-bouche avec les mains contaminées. L'absorption au niveau cutané sera favorisée par l'humidité et par l'augmentation de la température corporelle, constituant un microclimat à l'intérieur de la tenue de protection individuelle. (6)

I.4.3. Les agents biologiques

Les SP peuvent être exposés à des bactéries, des virus et des moisissures lors de leurs activités professionnelles. Les principaux réservoirs d'agents pathogènes sont l'homme (tuberculose), l'animal (Salmonelles), le sol (tétanos), l'eau (leptospirose) et les objets contaminés, telles que les seringues (Hépatites B ou C, SIDA).

I.4.4. Les agents chimiques

Les SP sont exposés à une multitude de substances chimiques, notamment lors des émissions de fumées en cas d'incendie. Il existe deux types majeures d'incendie (6) :

- Les feux de végétation (exposition au dioxyde de carbone (CO₂), au monoxyde de carbone (CO), et aux oxydes d'azote (NO_x),
- Les feux des bâtiments.

En ce qui concerne les fumées des feux de bâtiments, leur toxicité dépend du type de matériel en combustion. Leur complexité a beaucoup évolué ces dernières années, avec notamment l'augmentation de l'utilisation des matériaux plastiques et l'apparition des retardateurs de flammes, utilisés à la construction pour l'isolation des bâtiments.

I.4.4.1. Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP souvent évoqués dans le cadre de l'exposition professionnelle aux fumées, sont des composants naturels du charbon et du pétrole. Ils peuvent également être issus de la combustion incomplète de différentes matières organiques (carburants, bois, tabac). (7) Les

HAP contiennent des substances cancérigènes, parmi lequel les benzopyrènes classés « cancérogènes avérés Groupe 1 ». (7)

I.4.4.2. L`amiant

L'exposition professionnelle à l'amiant peut entrainer une fibrose pulmonaire (asbestose) et favoriser l'apparition de cancers broncho-pulmonaires. Très peu de cas de pathologies associées à l'amiant ont été déclarés chez les SP en France. Le risque lié à l'amiant reste considéré comme très faible. (6)

I.4.5. Les contraintes psychosociales et organisationnelles

Dans le cadre de la profession de SP, les contraintes organisationnelles se définissent par le rythme, les horaires et l'intensité du travail, qui peuvent être considérés comme atypiques. Le risque psychosocial peut être généré par les demandes psychologiques des différentes missions des sapeurs-pompiers, les comportements hostiles dans l'environnement au travail ou les conflits de valeurs. (6)

I.4.6. Les contraintes physiques

La contrainte physique représente l'exposition a une énergie suffisamment intense et pendant une certaine période, pouvant entrainer une blessure. Les principaux agents physiques auxquels les sapeurs-pompiers sont exposés sont :

- Le bruit,
- Les rayonnements ionisants (radioactivité, ...),
- Les rayonnements non ionisants (champs électromagnétiques, ...),
- Les ambiances thermiques (températures extrêmes),
- Le milieu hyperbare (pressions extrêmes),
- Les vibrations.

L'exposition aux rayonnements ionisants émis par des matériaux radioactifs peut se produire lors des interventions en cas d'accidents nucléaires.

I.5. La lutte contre l'incendie et l'effet thermique

La mission contre l'incendie soumet les sapeurs-pompiers à une activité physique intense réalisée dans des conditions de chaleur extrême. Le système cardiorespiratoire est très sollicité pendant les diverses missions des SP. Aussi, les contraintes physiologiques dues à la chaleur et à l'effort physique sont importantes. De plus, ces contraintes sont associées aux vêtements de protection qui préservent la chaleur du corps et exposent encore plus les sapeurs-pompiers aux accidents liés à la chaleur.

I.5.1. Les notions de chaleur et température

La chaleur, exprimée en joule (J) est l'énergie secondaire à l'agitation des particules qui composent un système. La température est une grandeur physique qui se définit à la fois par le degré d'agitation d'un système de particules, par le niveau d'équilibre thermique entre plusieurs systèmes et par l'entropie (le degré de désorganisation d'un système).

I.5.2. La thermorégulation

L'homme est un être homéotherme. Il maintient sa température centrale constante, proche de 36,8 degrés Celsius (°C), quel que soit son niveau métabolique ou les variations de la température du milieu extérieur. (7) Pour conserver cet équilibre, le flux global de chaleur du corps doit être nul, c'est-à-dire que l'organisme doit produire ou recevoir autant d'énergie thermique qu'il en perd. (9)

La thermorégulation représente l'ensemble des mécanismes physiologiques permettant à l'homme de maintenir sa température interne constante, afin d'assurer le bon fonctionnement des systèmes biologiques (membranes cellulaires, réactions chimiques). (10) Elle repose sur la variation constante entre les apports et les pertes de chaleur. Cette fonction complexe est régulée par le système nerveux central, principalement par l'hypothalamus en coopération avec le système limbique et la substance réticulée. (11)

L'organisme humain est un système thermique composé de 2 zones, le noyau et l'enveloppe (appelé également l'écorce) (figure 3). Le noyau est la zone qui produit de la chaleur. Il est constitué des organes internes, des muscles squelettiques et du système nerveux central, perfusés par le sang artériel dont la température est maintenue constante. Il représente environ 80% de la masse corporelle. L'enveloppe, qui est un système au pouvoir isolant et qui inclue la peau, les tissus cutanés et la graisse des tissus sous-cutanés, constitue le reste de la masse corporelle. On admet que la température de l'enveloppe est celle du revêtement cutané sous-jacent.

La température cutanée est estimée à partir de la moyenne des températures cutanées enregistrées au niveau de la paroi thoracique, des bras, des cuisses et des pieds. Elle est essentiellement influencée par la température de l'environnement. (7) La température du noyau est définie par la température du retour vers le cœur du sang veineux qui accumule la chaleur secondaire à l'activité des organes internes. Étant donné que la mesure de la température du sang à ce niveau est une procédure invasive et difficile à réaliser, les sites les plus communs pour la prise indirecte de la température centrale sont le rectum, l'œsophage et le tube digestif.

La température cutanée et celle des muscles peuvent varier de quelques degrés, alors que le noyau central tolère très peu de variations. La valeur maximale de la température corporelle au-delà de laquelle le risque vital est engagé est de 40 °C. (8) Toutefois, quelques études ont montré, notamment chez les patients atteints de cancers et chez des athlètes de haut-niveau, que la température corporelle pouvait atteindre les 42 °C sans conséquences sur la santé. (7)

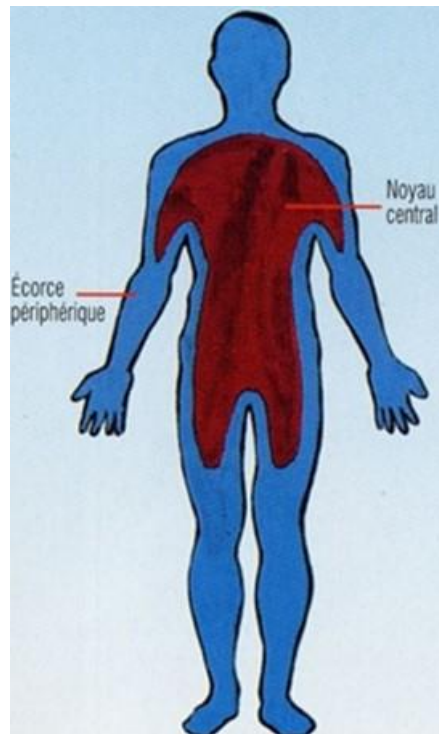


Figure 9 : Les couches thermiques chez l'homme (Source : Vola Racing)

I.5.3. La thermogénèse

La thermogénèse décrit l'ensemble des phénomènes ayant comme résultat la production de chaleur. Les apports de chaleur sont de deux types :

- La production interne de chaleur, consécutive au métabolisme de base (lié à l'activité des organes internes) et à l'activité physique (contraction), (12)
- L'absorption de chaleur du milieu extérieur (soleil, air ambiant, machines industrielles). (13)

I.5.4. La thermolyse

La thermolyse décrit l'ensemble des phénomènes qui permettent la dissipation de la chaleur corporelle. Les pertes de chaleur se réalisent par voie cutanée principalement et par voie respiratoire. La peau échange de la chaleur avec l'environnement en permanence. Le sens et l'intensité de cet échange dépend de la température de l'environnement et du pouvoir d'isolation thermique de la peau. Les échanges thermiques entre le corps et le milieu extérieur

à travers la peau se réalisent grâce aux phénomènes de convection, de rayonnement d'évaporation et de conduction.

I.5.4.1. La conduction

Le phénomène de la conduction est le transfert de chaleur par contact direct entre deux surfaces statiques. (6) (9) Cette forme d'échange thermique est bidirectionnelle et la direction du transfert de chaleur dépend du gradient de la température (depuis la surface moins chaude vers la surface plus chaude). Ce phénomène est un moyen efficace pour faire baisser la température corporelle chez les victimes des accidents d'hyperthermie (l'immersion de la victime dans l'eau froide crée un gradient de température important avec comme effet la diminution de la température corporelle).

I.5.4.2. La convection

Le phénomène de la convection est défini par un transfert de chaleur à travers un milieu conducteur (liquide ou gaz) circulant autour d'une surface. (9) Sous la douche, par exemple, la peau va absorber la chaleur du jet d'eau à condition que la température de l'eau soit plus élevée que celle de la peau.

I.5.4.3. Le rayonnement

Le phénomène de rayonnement correspond à un transfert de chaleur (sous forme d'ondes infrarouges) sans contact direct. Chez l'homme, ce type d'échange de température s'effectue entre la surface cutanée et l'environnement. La direction du transfert de chaleur dépend du gradient de température (depuis le plus chaud vers le moins chaud). Dans l'environnement extérieur, la principale source de chaleur rayonnante est le soleil.

I.5.4.4. L'évaporation

Le phénomène d'évaporation se traduit par un changement d'état physique de l'eau lorsqu'elle passe de l'état liquide à l'état gazeux. Ce mode de transfert est unidirectionnel et chez l'homme, il correspond au transfert de la chaleur des liquides de transpiration vers l'environnement sous forme de vapeurs d'eau. L'évaporation est le principal moyen de perte de chaleur corporelle (environ 80% de la chaleur corporelle est éliminée lors d'exercices physiques intenses). (8)

I.5.4.5. La respiration

Le transfert de chaleur par la respiration est de 2 types car l'inspiration et l'expiration de l'air s'accompagnent à la fois d'un échange de chaleur et d'eau. De ce fait, les échanges entre le corps et son environnement se font en fonction de 2 paramètres : la différence de température

et la différence de teneur en eau qui existe entre l'air dans les poumons et l'air environnant. La température et l'humidité de l'air, mais aussi le type d'activité professionnelle (qui va modifier le débit respiratoire) sont des paramètres déterminants.

Ces différents moyens de transferts de chaleur seront plus ou moins importants selon les conditions de l'environnement (température extérieure, humidité de l'air (hygrométrie), épaisseur des vêtements, activité physique) (figure 4).

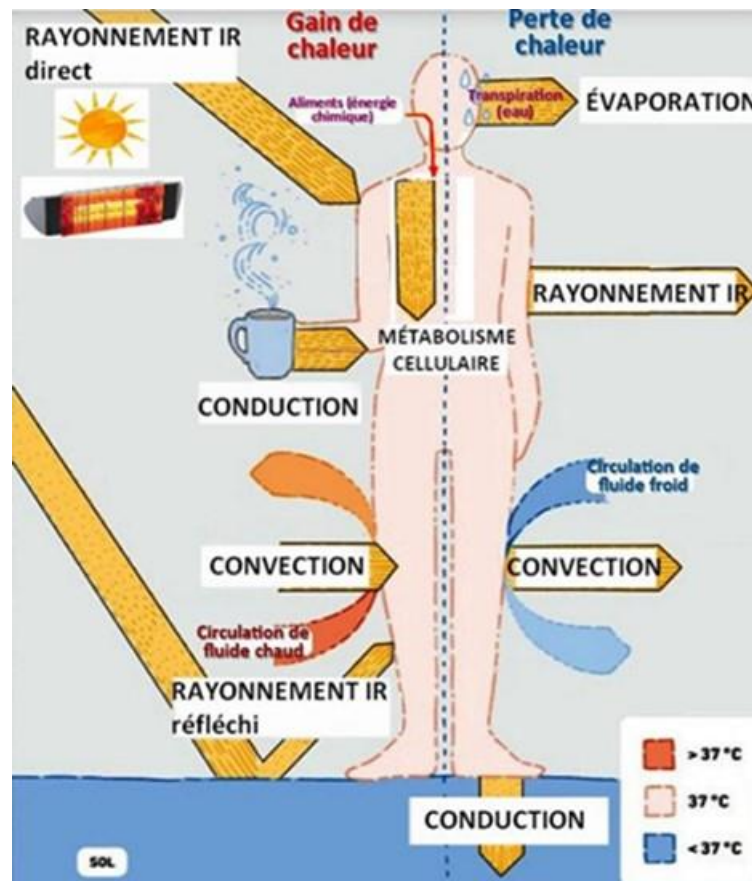


Figure 10 : Le bilan thermique (Source : SVT a Feuillade, Thème 2, Chapitre 3)

I.5.5. Le confort thermique

Le confort thermique se définit comme la satisfaction par un état d'esprit caractérisé par la satisfaction d'un individu en rapport avec son environnement. En conditions de confort thermique, le phénomène de la sudation est presque absent, la charge physique de travail est faible, les vêtements sont légers, le rayonnement de chaleur est très faible et la température de l'air se situe entre 18 et 25°C.

I.5.6. L'équilibre thermique

L'équilibre thermique décrit la situation quand la thermogenèse et la thermolyse sont en équilibre. Dans ce cas, les apports et les pertes de chaleur s'équilibrent facilement.

I.5.7. Le stress thermique

Le stress thermique se définit par la charge thermique globale que subit le corps des sujets exposés à des environnements chauds, qui provoque une augmentation de la température interne du corps. Elle est le résultat d'un apport combiné de chaleur métabolique, de facteurs environnementaux (température ambiante, humidité de l'air, vitesse de l'air et chaleur rayonnante) et des particularités vestimentaires (figure 5).

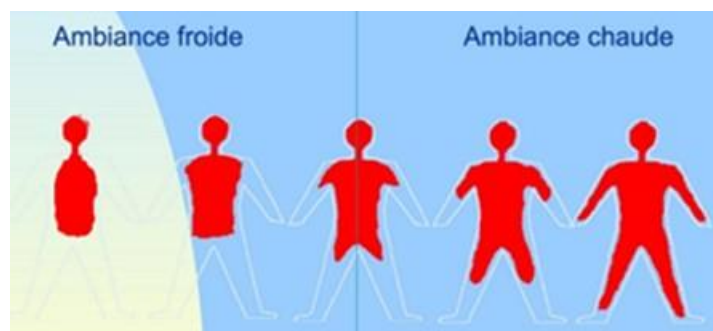


Figure 11 : Comportement des couches thermiques en fonction des l'ambiance extérieure
(Source : Vola Racing)

I.5.8. Facteurs influençant le stress thermique

I.5.8.1. L'activité physique

En cas de travail intense, une partie importante de l'énergie dégagée par la contraction musculaire est transformée en chaleur. Chez les SP, dans le cadre des missions « incendie », se rajoute aux conditions de chaleur extrême le poids de l'ARI et celui du reste de l'EPI, ayant comme effet l'augmentation de l'astreinte physique et par conséquent la production de chaleur supplémentaire.

I.5.8.2. L'habillement

Les vêtements ont un impact important sur le ressenti de la température et de l'humidité de l'environnement. Cet impact est évalué par l'indice « Clo » (en anglais « clothes »). Chaque pièce de vêtement possède son indice et l'addition de tout ce qui est porté donne un indice global (ex : une tenue estivale = 0,5 Clo ; printanière = autour de 1 Clo). (14) Chez les sapeurs-pompiers, l'équipement de protection individuel va empêcher les échanges de chaleur par évaporation de la sueur. Par conséquent, le maintien de la température centrale constante et l'équilibre thermique seront perturbés (figure 6).

I.5.8.3. Les caractéristiques de l'environnement

Les conditions du milieu extérieur vont interagir sur les différents phénomènes de transfert thermique qui permettront aux travailleurs d'échanger, plus ou moins efficacement, la chaleur

afin de maintenir l'équilibre thermique. Ces paramètres sont la température de l'air, la chaleur rayonnante, la vitesse de l'air et l'humidité relative de l'air.



Figure 12 : L'équipement de protection contre le feu (Source : SDIS 87)

I.5.9. Paramètres physiologiques influençant la thermorégulation

I.5.9.1. La condition physique

Une bonne condition physique permet une meilleure performance au travail à la chaleur grâce à une bonne capacité cardio-respiratoire, une sudation efficace et une concentration en sels diminuée. Chez le sujet obèse, les phénomènes de la thermorégulation sont altérés principalement à cause d'un plus grand effort musculaire nécessaire pour les mêmes tâches, dû à l'excès de poids.

I.5.9.2. L'âge

Les phénomènes de thermorégulation sont moins efficaces chez les nouveau-nés et les personnes âgées. (15)

I.5.9.3. Le genre

Chez les femmes, les phénomènes de la thermorégulation sont moins efficaces parce qu'elles présentent moins de masse musculaire qui est également distribuée différemment par rapport aux hommes. Cependant ces différences ne sont plus retrouvées après acclimatation.

I.5.9.4. Le rythme nyctéméral

La température centrale est plus élevée dans la journée avec un maximum des valeurs aux alentours de 17h, et baisse progressivement durant la nuit avec un pic observé entre 3h et 5h du matin. (15)

I.5.9.5. L'acclimatation

L'acclimatation est la capacité physiologique transitoire de l'organisme de s'habituer après des expositions multiples aux conditions de chaleur. Cette caractéristique démontre la propriété de thermoplasticité de la thermorégulation chez l'homme. (8) Pour obtenir les effets de l'acclimatation, il est nécessaire d'avoir une exposition répétitive à la chaleur de 8 à 12 jours (8). Les principales adaptations du phénomène de l'acclimatation sont : (15)

- Un seuil de déclenchement de la sudation abaissé (la température à partir de laquelle le sujet commence à transpirer est moindre que chez les individus non acclimatés),
- Un phénomène de vasodilatation cutanée déclenché à une température moindre,
- Une meilleure distribution de la sueur avec moins de pertes de sel.

Tous ces effets se traduisent par une meilleure performance au travail à la chaleur des sujets acclimatés, une diminution de la température centrale au travail et au repos ainsi qu'une réduction de la fréquence cardiaque. Ces effets sont transitoires et disparaissent entre 8 à 10 jours sans exposition à la chaleur.

I.6. Travail en ambiances thermiques

Les ambiances thermiques concernent le travail avec exposition à la chaleur ou le travail avec exposition au froid. (15) Les métiers concernés par l'exposition aux ambiances thermiques chaudes sont nombreux et divers. Il y a, d'une part, des professionnels qui travaillent à la chaleur de façon continue (fondeurs, verriers, boulangers, ...) et d'autres qui sont exposés à la chaleur de manière saisonnière (agriculteurs, chauffeurs routiers, travailleurs des espaces verts, ...).

Les sapeurs-pompiers sont exposés, lors des missions d'incendie, à des températures extrêmes pour une durée de temps variable. Le stress thermique est le premier facteur limitant

la durée des missions d'incendie plutôt que la mauvaise qualité de l'air ou l'inhalation de fumées. Aussi, le port de l'équipement individuel de protection augmente le risque cardiovasculaire, en partie dû à son poids et à la perturbation des phénomènes de la thermorégulation par effet d'étanchéité.

I.6.1. Effets de la chaleur sur la santé

En ambiance chaude, les apports de chaleur au niveau du noyau central se font soit par convection (lorsque la température de l'air est supérieure à la température cutanée), soit par conduction (par le contact entre le corps et un solide de température plus élevée). (13) Dans les 2 cas, la température cutanée augmente entraînant un réchauffement de la température centrale. En ambiance chaude, les phénomènes de la thermolyse permettent le maintien de l'homéothermie. La vasodilatation sanguine et la perte sudorale sont, dans une première phase, efficaces. C'est le cas de la **zone de température tolérable**.

La zone de température intolérable se définit par l'incapacité des mécanismes de thermorégulation de compenser les apports de chaleur. Les principaux effets secondaires directs de la chaleur, par ordre croissant de gravité sont :

- La dermatite de chaleur, manifestée par des macules et papules très irritantes, favorisées par la macération de la peau à cause de la sueur,
- L'œdème des extrémités, favorisé par la vasodilatation cutanée et la stase veineuse,
- Les crampes de chaleur, dû à un déséquilibre électrolytique (sodium, potassium, calcium, magnésium) touchant le plus souvent les membres et l'abdomen,
- La syncope, manifestée par une perte brève de connaissance due à l'hypotension orthostatique,
- Le syndrome d'épuisement-déshydratation, plus sévère, se manifeste par une asthénie, céphalées, nausées et troubles du sommeil de type agitation, survenant quelques jours après l'apparition du déséquilibre électrolytique,
- Le **coup de chaleur**, traduisant une hyperthermie majeure (la température corporelle au-dessus de 40 °C), caractérisé par une peau chaude, sèche et des phénomènes neurologiques graves incluant agitation, délire, convulsions et coma. Le coup de chaleur est une urgence médicale, puisqu'en l'absence de traitement, le décès survient rapidement.

I.6.2. Facteurs qui peuvent aggraver le travail à la chaleur

De multiples facteurs de risques individuels peuvent altérer les mécanismes d'adaptation de l'organisme aux fortes chaleurs. Les principaux facteurs de risque susceptibles d'accentuer les effets de la chaleur sont :

- Une activité de travail physique intense,
- Les exigences vestimentaires,
- Des pathologies chroniques (hyperthyroïdie, maladie de Parkinson, diabète),
- Une mauvaise condition physique,
- La grossesse,
- Des médicaments (diurétiques, AINS, neuroleptiques),
- La consommation d'alcool,
- La prise de drogues,
- La pollution atmosphérique (pouvant aggraver les pathologies respiratoires).

L'évaluation du risque peut se faire à partir de la mesure de la contrainte thermique ou de l'évaluation de l'astreinte thermique au poste de travail.

I.7. Contrainte et astreinte

Une contrainte est la restriction sur l'ensemble des actions possibles dans chaque état de la situation lorsqu'un travailleur est confronté à un problème défini. Contrairement à la contrainte, qui est ce qui s'impose à l'individu, l'astreinte est ce que l'individu doit réaliser pour réussir la contrainte. (16)

L'évaluation de la charge physique au travail peut être évaluée de 2 manières :

- Par l'étude des contraintes (le calcul de l'effort musculaire pour un effort donné),
- Par l'étude des astreintes (l'estimation des efforts physiologiques que l'organisme doit œuvrer face aux contraintes).

CONTRAINTE ⇔ TRAVAILLEUR ⇔ ASTREINTE

I.7.1. Les paramètres de la contrainte thermique

Les paramètres de base de l'ambiance thermique sont la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la température de rayonnement et la vitesse de l'air.

I.7.1.1. L`humidité relative de l`air

L`humidité relative de l`air (HR) est une mesure de la vapeur d'eau contenue dans 1 kilogramme d'air. Elle est exprimée en pourcentage (% HR). (16)

I.7.1.2. La vitesse de l'air

La vitesse de l`air mesure la vitesse de déplacement du courant d`air, exprimée en mètres par seconde (m/s). Elle se situe entre 0,15 et 0,25 m/s environ pour être agréable. L'individu ressent le courant d'air au-delà de 0,25 m/s. (15)

I.7.1.3. La température sèche de l'air

Cet indice est mesuré avec un thermomètre classique.

I.7.1.4. La température moyenne de rayonnement

La température moyenne de rayonnement a une influence importante sur le niveau de confort thermique et elle est mesurée à l`aide d'un thermomètre globe noir.

I.7.2. Mesure de la contrainte thermique

L`objectif de la mesure des contraintes thermiques dans l`environnement de travail est de protéger les salariés des effets liés à la chaleur. Les moyens le plus utilisés pour la détermination des contraintes thermiques sont la mesure de la température WBGT, défini dans le Règlement en santé et sécurité du travail (RSST) et la méthode de l`astreinte thermique prévisible (PHS), définie dans la norme ISO 7933.

I.7.2.1. L`indice WBGT

L`indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) est un indice composite de température utilisé pour estimer les effets de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire sur l'homme. Décrit par la norme ISO 7243, il **permet également d`estimer si une personne standard est capable de travailler dans une ambiance donnée sur une durée de 8 heures.**

La détermination de cet indice nécessite la connaissance de trois paramètres du milieu ambiant :

- La température du globe noir (Tg)
- La température de l`air (Ta)
- La température humide naturelle (Thn)

L`indice WBGT se calcule à partir de la formule suivante : $WBGT = 0,2Tg + 0,1Ta + 0,7Thn$.

La température du globe noir est déterminée à l'aide d'un thermomètre à globe noir. Il s'agit d'un thermomètre classique inséré dans un bouchon de caoutchouc, puis à l'intérieur d'une sphère en cuivre, revêtue de peinture noir mat. Le réservoir du thermomètre est placé au centre de la sphère. (16)



Figure 13 : Globe noir (Source : Acon Calibration and instruments trading)

		HUMIDITÉ RELATIVE EN %															
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
TEMPÉRATURE DE L'AIR EN °C	25	16,8	17,5	18,1	18,7	19,3	19,9	20,5	20,9	21,5	22,0	22,5	22,9	23,4	23,9	24,3	24,7
	26	17,6	18,3	18,9	19,6	20,1	20,7	21,3	21,9	22,4	22,9	23,4	23,8	24,3	24,8	25,3	25,7
	27	18,3	19,0	19,7	20,3	21,0	21,5	22,1	22,7	23,3	23,8	24,3	24,8	25,3	25,8	26,2	26,7
	28	19,1	19,7	20,5	21,2	21,7	22,4	23,0	23,7	24,2	24,8	25,2	25,7	26,2	26,7	27,1	27,7
	29	19,8	20,5	21,1	22,0	22,6	23,3	23,8	24,5	25,1	25,6	26,2	26,7	27,2	27,7	28,1	28,6
	30	20,5	21,3	22,0	22,7	23,5	24,1	24,7	25,4	26,0	26,5	27,0	27,6	28,2	28,6	29,1	29,6
	31	21,3	22,0	22,8	23,6	24,4	25,0	25,6	26,3	26,9	27,5	28,0	28,5	29,0	29,6	30,0	30,6
	32	21,9	22,8	23,6	24,3	25,2	25,8	26,5	27,1	27,7	28,3	28,9	29,5	30,0	30,6	31,0	31,6
	33	22,8	23,6	24,5	25,2	26,0	26,6	27,3	28,0	28,7	29,2	29,9	30,4	31,0	31,5	32,0	32,5
	34	23,4	24,4	25,3	25,9	26,8	27,5	28,2	28,9	29,5	30,2	30,8	31,3	31,9	32,4	33,0	33,5
	35	24,2	25,1	25,9	26,8	27,6	28,4	29,1	29,8	30,5	31,1	31,7	32,3	32,9	33,4	34,0	34,4
	36	24,8	25,9	26,7	27,6	28,4	29,3	29,9	30,7	31,4	32,1	32,6	33,3	33,9	34,4	35,0	35,4
	37	25,7	26,7	27,5	28,4	29,2	30,1	30,8	31,6	32,3	32,9	33,6	34,2	34,7	35,4	35,9	36,4
	38	26,5	27,3	28,3	29,2	30,0	30,9	31,7	32,4	33,1	33,8	34,5	35,1	35,7	36,3	36,8	37,4
	39	27,1	28,1	29,1	30,0	30,9	31,8	32,5	33,3	34,1	34,7	35,4	36,0	36,7	37,2	37,8	38,3
	40	27,7	28,9	30,0	30,8	31,8	32,7	33,4	34,3	35,0	35,6	36,3	37,0	37,6	38,2	38,8	39,3

Figure 14 : Température WBGT estimée à partir de l'humidité relative (Source : emploi.belgique.be/ambiances-thermiques)

Les valeurs d'action d'exposition à la chaleur sont fixées à partir de l'indice de contrainte thermique WBGT en fonction de la charge physique de travail. (17) Les régimes d'alternance travail/repos en fonction de la température WBGT et de l'acclimatation sont présentés tableau 1 et 2. L'estimation porte sur des valeurs moyennes et ne prend pas en compte les ambiances où la contrainte thermique est fluctuante dans le temps. (16)

Régime d'alternance travail / repos	Charge de travail		
	travail léger	travail moyen	travail lourd
Travail continu	30,0	26,7	25,0
Travail 75 %, repos 25 % (toutes les heures)	30,6	28,0	25,9
Travail 50 %, repos 50 % (toutes les heures)	31,4	29,4	27,9
Travail 25 %, repos 75 % (toutes les heures)	32,3	31,1	30,0

Tableau 1 : Régimes d'alternance travail/repos en fonction de la T°

Travail	Acclimaté				Non acclimaté			
	Léger	Modéré	Lourd	Très lourd	Léger	Modéré	Lourd	Très lourd
100 % travail	29,5	27,5	26,0	-	27,5	25,0	22,5	-
75 % travail; 25 % repos	30,5	28,5	27,5	-	29,0	26,5	24,5	-
50 % travail; 50 % repos	31,5	29,5	28,5	27,5	30,0	28,0	26,5	25,0
25 % travail; 75 % repos	32,5	31,0	30,0	29,5	31,0	29,0	28,0	26,5

Tableau 2 : Régimes d'alternance travail/repos en fonction de la T° WBGT et de l'acclimatation

I.7.2.2. L`indice de sudation requise

Le PSH (Predicted heat strain) permet d`estimer le débit de sueur et la sudation que le corps doit effectuer afin d`assurer l`équilibre thermique. Plus précis que le WBGT, cet indice prédit l`évolution dans le temps de la sudation et de la température centrale du corps, à partir de six paramètres : (20)

- Température de l`air (ta),
- Humidité relative (HR),
- Température du globe noir (tg),
- Vitesse de l`air (Va),
- Métabolisme énergétique (M),
- Isolation thermique du vêtement (Icl).

L'intensité de l'effet de la contrainte thermique est déterminée en fonction des valeurs maximales de mouillure et de sudation requises et elle prend également en compte l'état d'acclimatation du sujet. Deux valeurs seuils sont définies : (18)

- Un seuil d'alarme, qui correspond à l'augmentation de la température interne de 0,8 °C et une perte hydrique comprise entre 3250 et 2600 g (selon que le travailleur est acclimaté ou non),
- Un seuil de danger, correspondant à une élévation de 1,0 degrés Celsius et à une perte hydrique comprise entre 5200 et 3900 g).

Une durée limite d'exposition (DLE) est calculée à partir de ces seuils.

I.7.3. Règlementation pour le travail à la chaleur

Le travail à la chaleur constitue un risque pour les salariés, ayant comme résultat la dégradation de leur santé physique et psychique. Selon le Code du Travail, l'employeur a l'obligation de prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé des travailleurs et d'assurer leur sécurité. Il ne donne toutefois aucune indication de valeur de température de l'environnement pour le travail à la chaleur (Article L. 4121-1 du Code du travail).

I.8. L'évaluation de l'astreinte thermique par cardiofréquence-métrie

La chaleur agit de manière directe sur le corps humain en l'échauffant. L'intervention de la thermorégulation aura comme effet l'apparition des phénomènes compensatoires et adaptateurs. La vasodilatation cutanée a comme rôle de transférer la chaleur du noyau vers la superficie, par conséquent, l'afflux de la circulation cutanée entraîne une modification des besoins en oxygène. L'augmentation du débit cardiaque étant limitée, l'adaptation à la chaleur se traduit majoritairement par une augmentation de la fréquence cardiaque. Ainsi, la fréquence cardiaque est un moyen d'évaluer la contrainte thermique. La fréquence cardiaque est l'un des paramètres physiologiques les plus simples à mesurer, pour évaluer l'astreinte thermique d'un poste de travail (Meunier, 2010). En cas d'astreinte thermique, la variation de la fréquence cardiaque est, en général, visible plus précocement que les variations hydrique et thermique (Dessureault et Doucet, 2001).

I.8.1. Adaptation cardiaque à l'effort

Le débit cardiaque (Q) exprimé en ml/mn représente le volume systolique exprimé en ml, multiplié par la fréquence cardiaque ($Q=VS \times Fc$). La consommation d'oxygène (VO_2) est reliée au débit cardiaque et de la différence des concentrations en O_2 , artériel et veineux.

A l'effort, le débit cardiaque augmentent dans une première phase jusqu'à 1,5 fois la valeur de repos, pour redevenir proche de la valeur de repos en cas d'effort intense. Le facteur adaptateur principal sera essentiellement l'augmentation de la fréquence cardiaque.

I.8.2. Facteurs de variation de la fréquence cardiaque

De nombreux facteurs peuvent être à l'origine de variation de la fréquence cardiaque et être utiles à l'interprétation des tracés de CFM : (19)

- L'âge,
- Le sexe,
- Le rythme nyctéméral,
- Le sommeil,
- Le stress,
- La posture,
- Le travail musculaire,
- L'entraînement physique,
- L'apprentissage,
- La digestion,
- La prise de Café, alcool, tabac,
- La chaleur,
- Le bruit,
- L'altitude.

I.8.3. Principes de la cardiofréquencemétrie

La cardiofréquencemétrie (CFM) est un moyen fiable pour l'évaluation objective de la charge physique au travail, se réalisant en 3 étapes :

- Première étape : la première étape consiste dans l'enregistrement continu de la fréquence cardiaque au travail,
- Deuxième étape : la deuxième étape est l'extraction des données obtenues pendant le travail, et de calculer la moyenne des valeurs de FC et de déterminer les valeurs de crête,
- Troisième étape : la troisième étape représente l'étalonnage des données obtenues et leur interprétation en fonction des profils des sujets examinés, afin de comparer les individus entre eux et d'évaluer la pénibilité d'un poste de travail.

Il existe 2 méthodes pour évaluer la pénibilité d'un poste de travail :

- L'**épreuve d'effort** (peu réaliste en milieu du travail à cause de sa dangerosité et la FC à l'effort de pédalage peut être différente de la FC générée par l'effort physique sur le poste de travail),
- La méthode des **coûts cardiaques**. C'est cette méthode qui sera détaillée.

I.8.3.1. La méthode des coûts cardiaques

La méthode des coûts cardiaques se base sur la détermination d'une FC de référence qui permet ensuite le calcul des indices de pénibilité d'un poste de travail.

I.8.3.1.1. La fréquence cardiaque de référence

La fréquence cardiaque de référence ou FCo, FC dite de repos, peut se déterminer de plusieurs façons :

- La médiane des 6 heures de sommeil : la médiane des FC les plus basses pendant 6 heures consécutives de sommeil,
- La FC mesurée juste avant le travail qui correspond à la moyenne des 5 dernières minutes de repos, après un repos de 10 minutes en position assis, avant l'heure du début du travail,
- Le premier percentile de travail qui correspond à la valeur d'enregistrement des FC sur toute la période de travail en comptant les 5 minutes de repos assis.

I.8.3.1.2. La fréquence cardiaque moyenne de travail

Il s'agit d'un indice de pénibilité basée sur la FC moyenne de travail. Elle correspond à la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de fréquences cardiaques prises pendant la totalité du travail, incluant les pauses. Selon l'INRS, les limites des valeurs de la FC moyenne sur 8 heures de travail sont de 100 battements par minute (bpm) pour les hommes et 105 bpm pour les femmes. (19)

I.8.3.1.3. La fréquence cardiaque de récupération

Elle correspond à la diminution de la FC après l'arrêt de l'exercice. Elle comprend deux phases. La première, qui correspond à la récupération métabolique, qui tend à disparaître en 1 à 2 minutes et la phase de récupération thermique, qui représente la diminution progressive de la température corporelle après l'arrêt de l'activité. Elle est plus lente et correspond à la moyenne des fréquences cardiaques de la 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} minute après l'arrêt de l'exercice.

I.8.3.1.4. Le coût cardiaque absolu moyen

Cet indice représente la différence entre la FC moyenne et la FC de repos. Il est exprimé en bpm ($CCA \text{ moy (bpm)} = FC \text{ moyenne} - FCo$). Un poste de travail est considéré comme pénible quand le CCA moyen est supérieur à 30 bpm. (20)

I.8.3.1.5. Le cout coût cardiaque relatif moyen

Cet indice représente le rapport entre le CCA et la FC de réserve. La FC de réserve (FCr) correspond à la différence entre la FC maximale théorique (FCMT) du sujet et la FC de repos. (20) C'est un indice essentiel dans la CFM parce qu'il représente l'équivalent du pourcentage $VO_2\text{max}$. Il est exprimé en pourcentage ($CCR \text{ moy (\%)} = CCA \text{ moy} / (FCMT - FCo)$). Le CCR doit être inférieur à 30% sur une journée de travail. (19)

I.8.3.1.6. La fréquence cardiaque de crête sur une phase de travail

Cet indice représente la valeur instantanée la plus élevée de la FC sur la totalité du tracé de CFM du poste. (20) Sa valeur ne doit pas dépasser 145 bpm (hommes ou femmes) sur plus de 5 minutes au cours d'un poste de travail. (19)

I.8.3.2. Grilles de pénibilité

Des grilles évaluant la pénibilité d'un poste de travail ont été élaborées en réunissant différents indices pour obtenir un score. L'indice le plus précis et le plus souvent utilisé est le CCR.

Les principales grilles de pénibilité cardiaque aux postes de travail sont :

- La grille de Chamoux
- La grille de Frimat
- La grille de Monod et Kapitaniak
- La grille de Wu et Wang
- La grille de Meunier-Smolik et Knoche

I.9. L'entraînement en caisson de feu

Le caisson feu est un dispositif permettant aux sapeurs-pompiers de s'entraîner dans des conditions ressemblant à la réalité en reconstituant les phénomènes thermiques et fumigènes auxquels les SP pourraient être confrontés. (21) Ces exercices permettent aux SP d'être mieux formés et d'agir de façon plus efficace et en sécurité en cas d'incendie. Ces entraînements sont organisés et encadrés par les SP formateurs. Lors d'un brûlage, le personnel d'encadrement varie de 3 à 5 instructeurs. (22)

Dans l'ensemble des outils de simulation, les containers maritimes occupent une place de choix (photographies 1 et 2). (22) Le caisson maritime a la particularité d'être incombustible, durable, maniable et homogène. Le combustible utilisé est le gaz ou le bois. Il existe plusieurs types de caissons maritimes : (23)

- **Le caisson d'observation** : nommé aussi "caisson flash-over" permet l'observation des signes annonciateurs d'un embrasement généralisé et de la réalisation du procédé d'entrée dans un volume enfumé. C'est un container maritime de 40 pieds, aménagé pour pouvoir montrer le développement du feu dans un espace semi-ouvert. Il est doté d'une zone de feu appelée aussi chambre de brûlage, d'une zone d'observation et de portes d'évacuation,
- **Le caisson d'attaque** : conçu pour exercer les techniques de lance sur un feu pleinement développé. C'est un caisson maritime de 20 pieds, adapté pour pouvoir créer du feu pleinement développé,
- **Le caisson à back-draft** : montre les signes annonciateurs d'une explosion des fumées. C'est un caisson maritime de 20 pieds qui simule des explosions de fumées et en particulier le phénomène dit " back-draft". Entièrement isolé et doublé, il est manipulé par les formateurs de l'extérieur du volume.



Photographie 1 : Le nouveau caisson du SDIS 87



Photographie 2 : Fumées de pyrolyse

II. Objectifs

II.1. Objectif principal

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer l'astreinte thermique des sapeurs-pompiers professionnels ou volontaires de Limoges pendant les entraînements en caisson de feu.

II.2. Objectifs secondaires

Les objectifs secondaires étaient de :

- Déterminer s'il existait un risque pour la santé des sapeurs-pompiers professionnels ou volontaires de Limoges en lien avec les contraintes thermiques de l'exercice en caisson de feu.
- Déterminer s'il existait une situation de travail plus à risque ou plus exposante aux contraintes thermiques lors de l'exercice en caisson de feu.

III. Matériels et méthodes

Ce travail avait comme objectif l'évaluation des contraintes physiologiques subies par des sapeurs-pompiers lors de simulations d'incendie en caisson de feu. Il a été réalisé une étude préliminaire transversale sur un échantillon de sapeurs-pompiers professionnels et volontaires du SDIS de Limoges sur une période de 5 jours, du 10 au 15 mars 2024. Il s'agissait d'effectuer des mesures transversales et répétées des astreintes thermiques et des contraintes cardiaques de sapeurs-pompiers professionnels ou volontaires du SDIS 87 lors de session d'entraînements, dans un caisson de feu d'observation qui se trouvait au site d'exercices des sapeurs-pompiers du SDIS 87, à Limoges-Romanet. Cette évaluation a été validée par la Direction du SDIS de Limoges.

III.1. Population étudiée

L'étude impliquait les sapeurs-pompiers (SPP ou SPV) présents les jours d'entraînement. Il y avait 6 sapeurs-pompiers stagiaires et 1 sapeur-pompier formateur. Parmi les stagiaires, il y avait 2 SP volontaires et 4 SP professionnels. Le critère d'inclusion était d'être à jour avec la visite de maintien en activité. Les critères d'exclusion était de ne pas respecter la condition d'aptitude sapeur-pompier et la constatation, le jour des simulations, de toute contre-indication à la pratique d'une activité physique (céphalées, fièvre, pathologies musculo-squelettiques) le jour des simulations.

III.2. Déroulement de l'étude

Il a été réalisé une étude préliminaire sur un échantillon de sapeurs-pompiers professionnels et volontaires du SDIS de Limoges, sur une période de 5 jours, du 10 au 15 mars 2024. Chaque journée commençait à 8h dans la salle de cours du site de Romanet. L'investigateur arrivait avant les SP, pour préparer le matériel nécessaire à l'étude. Les stagiaires et le formateur SP définissaient ensuite le programme des simulations pour chaque demi-journée d'exercice.

L'étude pour mesurer l'astreinte thermique comprenait 2 phases :

III.2.1. La phase d'avant le brûlage

Après avoir eu les informations sur le déroulement des brûlages, les SP participant à l'étude ont suivi de manière standardisée le processus suivant :

- ❶ Pesage des SP en sous-vêtements.
- ❷ Pose de la ceinture pectorale permettant l'enregistrement continu de la fréquence cardiaque (dont les électrodes ont été mouillées au préalable). Chaque SP portait un

cardiofréquencemètre de type Polar H10 pré-programmé en fonction du poids, de la taille et de l'âge (photographie 3).



Photographie 3 : Cardiofréquencemètre Ceinture Polar H10

- ③ Ensuite les SP participants devaient remplir un auto-questionnaire (annexe 1).
- ④ Cette période de repos d'environ 10 minutes était l'occasion d'enregistrer la fréquence cardiaque de repos (FCo). La température centrale de repos a été ensuite prise à l'aide d'un thermomètre tympanique, les SP étaient alors en tenue normale. La pression artérielle était également mesurée.
- ⑤ Une fois l'auto-questionnaire rempli et les mesures initiales faites, les SP stagiaires se rendaient dans la cour du site d'exercices pour préparer les palettes qui serviront de combustible pour la reproduction des phénomènes thermiques dans le caisson. Les tenues de protection contre le feu propres et les ARI se trouvaient dans une cabine située à environ 40 mètres du caisson. La tenue de protection se composait d'une veste ignifugée, un pantalon ignifugé, des gants ignifugés, des sous-gants en nitrile et d'un casque de lutte contre les incendies. La tenue de protection associée à l'ARI pesaient (ensemble) environ 20 kilogrammes.
- ⑥ Pour chaque session de brûlage en caisson, les stagiaires occupaient 3 postes :
 - **Le poste F1** : il est situé à la **porte de la chambre** de brûlage. Le SP avait le contrôle sur le développement du feu et sur la reproduction des phénomènes thermiques. Le poste F1 est le poste le plus exposant à des températures élevées,
 - **Le poste F2** : il est situé à l'**entrée du caisson**. Le SP modulait les conditions à l'intérieur du caisson à l'aide de portes métalliques. Le poste F2 expose à des températures moins élevées, mais c'est à ce poste qu'il est effectué le plus d'efforts physiques,
 - **Le poste F3** : le SP est assis dans la chambre d'observation et observe les phénomènes thermiques reproduits dans le caisson.

Le but était que chaque SP passe à la porte de la chambre de brûlage (poste F1) au moins une fois durant la semaine de brûlages. Les températures du caisson étaient affichées sur un

moniteur positionné à l'extérieur du caisson. Les températures étaient enregistrées à l'aide des capteurs placés dans 4 endroits différents du caisson. La température T1, plus élevée, était la température au milieu de la chambre de brûlage et correspondait à la température du foyer. La température T2 était la température du plafond de la porte de la chambre de brûlage. La température T3 était la température à environ 1 mètre de hauteur du sol de la chambre d'observation et correspondait à la température à laquelle étaient exposées les têtes des SP. La température T4 correspondait à la température à l'entrée dans le caisson.

Après l'embrasement d'une quantité variable de palettes en bois à l'aide d'un pistolet à gaz, les SP en position assis dans le caisson assistaient au développement du feu (photographie 4). Cette phase durait environ 16 minutes, en fonction de la rapidité du brûlage des palettes et des phénomènes thermiques reproduits.



Photographie 4 : Intérieur du caisson en début de brûlage

En cas de survenue de céphalées, de nausées ou de crampes musculaires, les SP avaient pour ordre d'interrompre la manœuvre. Ils étaient également libres d'arrêter l'entraînement pour toutes autres raisons.

Le relevé de la fréquence cardiaque était disponible en temps réel sur l'application Polar Team. L'analyse des enregistrements a été réalisée grâce à l'application Polar Team, téléchargée sur une tablette Apple. La FC maximale théorique était calculée automatiquement sur l'application à partir de l'âge du sujet avec la formule d'Astrand.

III.2.2. La phase d'après le brûlage

Après la sortie du caisson, les SP enlevaient leurs EPI en commençant par le casque et la bouteille de l'ARI. La température tympanique après exposition était prise dans les 5 minutes après la sortie du caisson, les SP étant encore équipés. La perte hydrique a été estimée en repesant les SP en sous-vêtements, avant de se réhydrater. L'heure de l'entrée et de la sortie du caisson ont été notées et permettaient le calcul des extra pulsations cardiaques thermiques (EPCT) de la 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} minutes après la sortie du caisson.

La dernière étape de la phase d'après brûlage était de remplir la deuxième partie du questionnaire, pour l'évaluation de la tolérance des SP lors de l'exercice dans le caisson.

III.3. Le questionnaire (annexe 1)

Le questionnaire, rempli par les SP le premier jour avant le début de la manœuvre, était constitué de 5 parties :

- ❶ **Données socioprofessionnelles** : les données recueillies étaient le nom et prénom, le genre, la date de naissance, le grade, le statut, et l'ancienneté dans la fonction.
- ❷ **Données cliniques** : les données recueillies étaient le poids, la taille, la présence d'antécédents médicaux personnels de tabagisme, d'hypertension artérielle, d'hypercholestérolémie, d'asthme, d'allergies respiratoires ou l'existence d'antécédents médicaux familiaux d'infarctus du myocarde (IDM) ou d'accident vasculaire cérébral (AVC).
- ❸ **Données concernant les entraînements en caisson de feu** : les données recueillies étaient le nombre d'entraînements en caisson réalisées dans le passé, les symptômes ressentis pendant ou après l'exercice et le type de symptômes vécus.
- ❹ **Données concernant la condition physique des sapeurs-pompiers** : les données recueillies étaient la fréquence de la pratique d'une activité sportive et le type d'activité physique pratiquée.
- ❺ **Données concernant la perception subjective de la difficulté de l'entraînement au caisson de feu** : cette rubrique était remplie après l'arrêt de l'exercice et le but était d'évaluer de façon subjective le ressenti des SP par rapport à la difficulté et les conditions de l'exercice dans le caisson.

III.3.1. Variables mesurées

III.3.1.1. Fréquences cardiaques

La fréquence cardiaque a été enregistrée avant, pendant et après l'exercice avec un cardiofréquencemètre de type ceinture pectorale Polar H10 connectée à l'application Polar Team. L'application permet d'obtenir la FC de repos, la FC moyenne, la FC de crête, la FC maximale théorique, et la courbe de FC obtenue à l'arrêt de l'enregistrement de la session de brûlage. A partir de ces valeurs nous avons pu calculer le cout cardiaque relatif moyen.

Nous avons mesuré cinq indices de fréquence cardiaque :

- ❶ **La fréquence cardiaque de repos** : nous avons utilisé la fréquence cardiaque de repos calculée à partir de la moyenne des fréquences cardiaques des 5 dernières minutes avant le début de l'exercice, après un repos de 10 minutes dans la salle de cours, les SP en position assis et en tenue normale.

- ❷ **La fréquence cardiaque moyenne au travail** : elle correspondait à la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de fréquences cardiaques prises pendant la totalité du travail, incluant les pauses.

- ❸ **La fréquence cardiaque de crête** : elle correspondait à la fréquence cardiaque la plus élevée atteinte durant la totalité de l'enregistrement.

- ❹ **La fréquence cardiaque de récupération** : l'application Polar Team ne permettait pas d'obtenir des valeurs moyennes de fréquence cardiaque pour des fenêtres de temps des 1, 2, 3, 4 minutes. Afin de calculer la valeur des EPCT, une application qui enregistrait l'écran en permanence et en temps réel était lancée après chaque sortie du caisson. L'heure de l'entrée de la sortie du caisson ont été également notées. Un fichier Excel fut donc créé afin d'obtenir les moyennes des fréquences cardiaques de la 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} minutes après la sortie du caisson. Ces valeurs correspondaient à la composante thermique de la fréquence cardiaque de récupération.

III.3.1.2. Température centrale

En situation de travail, la température tympanique est une mesure corporelle suffisamment représentative de la température centrale. La température de repos a été prise dans la salle de cours, avant le début des exercices, les SP en uniforme et la température post brûlage a été prise dans les 5 minutes après la sortie du caisson, les SP en tenue de feu. L'appareil utilisé était le thermomètre Braun Thermoscan. Cette méthode permet d'obtenir la température de la membrane tympanique dont la vascularisation provient de l'artère carotide interne.

III.3.1.3. Autres mesures

- ❶ **La perte hydrique** : la perte hydrique a été estimée par la perte du poids corporel. Les SP ont été pesés en sous-vêtements avant la manœuvre et après la sortie du caisson, avant qu'ils ne se réhydratent. La perte hydrique, exprimée en kilogrammes, correspondait à la différence de poids avant l'entrée et après la sortie du caisson. L'appareil utilisé était une balance mécanique Seca.
- ❷ **La pression artérielle** : la pression artérielle a été prise à l'aide d'un tensiomètre manopaire de la marque Spengler. La pression artérielle de repos a été mesurée dans la salle de cours, le matin, avant le début des exercices, les SP en tenue normale. La pression artérielle post-brulage a été prise à la fin de la journée, dans la salle de cours, les SP en tenue normale.

L'ensemble des étapes de l'étude est présenté figure 9.

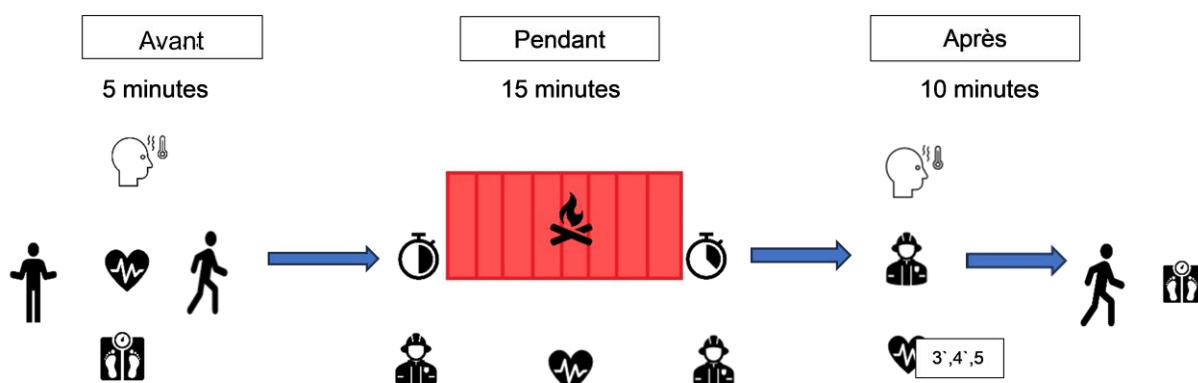


Figure 9 : Schéma des étapes de l'étude

IV. Résultats

IV.1. Caractéristiques des sapeurs-pompiers étudiés

IV.1.1. Données socio-professionnelles

Au total, 6 sapeurs-pompiers sur 7 présents les jours de brûlages ont participé à l'étude (taux de participation de 85,7%). Concernant leur statut, il y avait 4 SPP (66,6%) et 2 SPV. L'âge moyen était de 35 années ($\pm 5,5$ années) et l'ancienneté moyenne dans la profession de 15,3 années ($\pm 6,4$ années). En ce qui concernait le grade, 2 étaient adjudants (33,3%), 2 étaient sergents (33,3%), 1 était caporal (16,6%), et 1 était lieutenant (16,6%).

IV.1.2. Données cliniques

Concernant l'indice de masse corporel, 4 SP étaient en surpoids. Aucun sapeur-pompier n'a déclaré avoir d'antécédent personnel d'hypertension artérielle, de diabète ou d'hypercholestérolémie. Concernant des pratiques addictives, 2 SP (33,3%) étaient fumeurs. Aucun n'a déclaré avoir des antécédents respiratoires de type asthme, d'allergies respiratoires ou de toux chronique. Un seul SP prenant un traitement au long cours (16,6%). Pour les antécédents familiaux, 4 sapeurs-pompiers (66,6%) ont déclaré avoir des antécédents familiaux (2 AVC chez la mère, 1 AVC chez le père et 1 IDM chez le père).

IV.1.3. Données concernant l'expérience en caisson de feu

Parmi les 6 sapeurs-pompiers stagiaires, la moitié a déjà réalisé des entraînements en caisson de feu par le passé, et ceux-ci étaient tous SPP. Le nombre moyen de brûlages effectués par ceux-ci étaient de 21,5 brûlages par personne. En ce qui concerne la répartition en fonction des symptômes liés à la chaleur du caisson, la moitié parmi ceux ayant réalisé des brûlages a déclaré avoir subi des symptômes. Les symptômes décrits par l'un des stagiaires étaient les céphalées et l'essoufflement. L'autre a décrit des palpitations et de l'anxiété après le brûlage.

IV.1.4. Données concernant la condition physique

Une pratique régulière d'activité physique était retrouvée chez 100% des SP mais les SPP avaient une activité physique plus fréquente (supérieure à 3 fois par semaine) tandis que les 2 SPV pratiquaient une activité physique moins de 3 fois par semaine.

IV.1.5. Données subjectives concernant l'ambiance dans le caisson

Concernant le niveau d'appréhension avant le début de la session de brûlages dans le caisson, la moyenne de l'appréhension mesurée par une échelle visuelle analogique était de 3,8 ($\pm 1,6$) et s'étendait de 2 à 6 sur 10. En ce qui concernait la tolérance de l'environnement d'exercice dans le caisson de feu, à la fin de la première journée de brûlage, 3 SP sur 6 (50%) avaient décrit avoir rencontré des difficultés pour tolérer les conditions dans le caisson, tandis qu'à la fin du dernier jour de l'exercice, 5 stagiaires sur 6 (83,3%) déclaraient trouver les conditions du caisson difficiles.

IV.2. Mesure de l'astreinte thermique

Au total, 28 mesures ont pu être effectuées au cours de 5 sessions d'exercice au caisson de feu.

IV.2.1. La perte hydrique

La perte de poids moyenne par poste était de 100 grammes (± 400 grammes) tout poste confondu. Une perte maximale de 500 grammes a été enregistrée pour les postes F2 « entrée » et F3 « observateur ».

IV.2.2. La variation de la température centrale

La valeur moyenne de la différence de température avant l'entrée et après la sortie du caisson était de $+ 1,1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,6^{\circ}\text{C}$) sur la totalité des brûlages. L'élévation maximale de la température a été de $2,1^{\circ}\text{C}$ chez un SP ayant eu une température tympanique de $38,9^{\circ}\text{C}$ à la sortie du caisson. La variation moyenne de la température par poste a montré que le poste F3 « observateur » était celui où les variations de température étaient les plus faibles.

IV.2.3. La variation de la fréquence cardiaque

- La moyenne de la **fréquence cardiaque de repos** sur l'ensemble des brûlages était de **87,6 bpm** ($\pm 12,8$ bpm), s'étendant de 70 bpm (minimum) à 130 bpm (maximum).
- La **fréquence cardiaque moyenne au travail pendant le brûlage** sur l'ensemble des brûlages était de **109,4 bpm** ($\pm 20,4$ bpm), s'étendant de 80 bpm (minimum) à 162 bpm (maximum).
- La moyenne de la **fréquence cardiaque de crête pendant le brûlage**, tout poste confondu, était de **145,7 bpm** ($\pm 19,2$ bpm), s'étendant de 118 bpm (minimum) à 185 bpm (maximum).

IV.2.4. La fréquence cardiaque de récupération

La moyenne des valeurs de la fréquence cardiaque à la 3^{ème} minute après la sortie du caisson était de 111,5 bpm (\pm 13,2), celle à la 4^{ème} minute était de 105,6 bpm (\pm 14,4) et de 100,0 bpm (\pm 13,0) à la 5^{ème} minute.

IV.3. Indices de pénibilité au travail

IV.3.1. Calcul du coût cardiaque

Le coût cardiaque absolu (CCA) moyen, tout poste confondu, était de **21,8 bpm** (\pm 14,8) s'étendant de 4 à 59 bpm.

Le coût cardiaque relatif (CCR) moyen, tout poste confondu, était de **23,2%** (\pm 16,9) s'étendant de 3,9 à 72 %.

IV.3.2. Calcul des EPCT

Le calcul des extra-pulsations cardiaques thermiques (EPCT) retrouvait une moyenne de **18,1 bpm** (\pm 10,8) s'étendant de -6,7 à 37,7 bpm.

IV.3.3. Calcul du score de pénibilité globale selon la grille CHAMOIX

D'après la méthode de calcul de la pénibilité du poste selon la grille de CHAMOIX, la grande majorité des brûlages impliquait une astreinte cardiaque légère (57,1%).

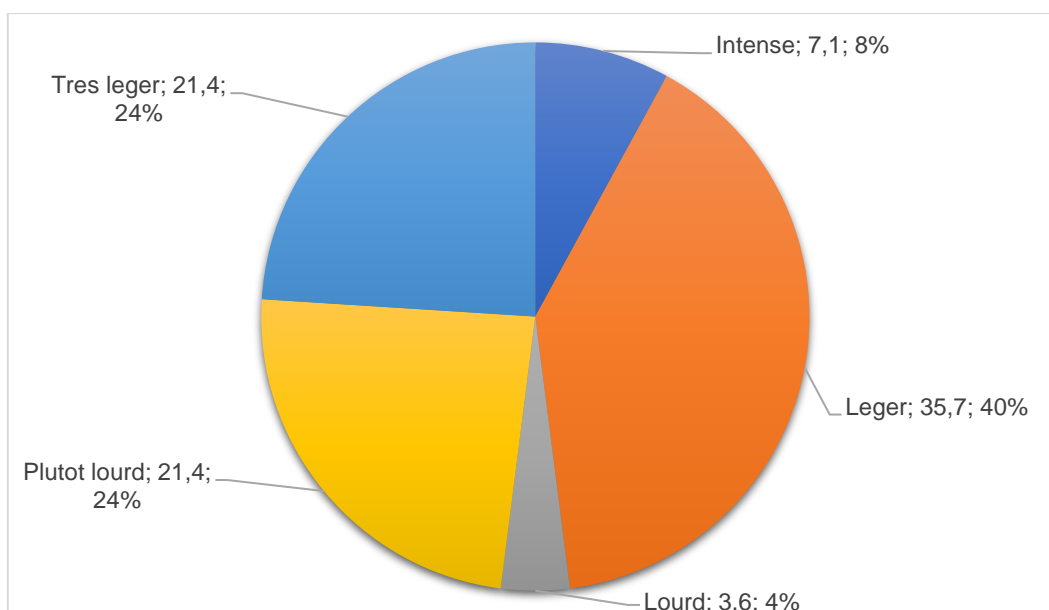


Figure 10 : Pénibilité globale des postes selon la Grille CHAMOIX

IV.4. Analyse des données en fonction du poste occupé pendant le brûlage

L'analyse des différents paramètres mesurés lors des 5 exercices de brûlage par postes de travail (F1 « à la porte de la chambre », F2 « à l'entrée du caisson » et F3 « observation du phénomène thermique ») est présentée tableau 3.

Variables	Global	F1 Porte	F2 Entrée	F3 Observateur
Variation température centrale (°C)	1,1 (± 0,6)	1,4 (± 0,6)	1,4 (± 0,2)	0,9 (± 0,5)
Fréquence cardiaque (bpm)				
<i>Moyenne pendant brûlage</i>	109,4 (± 20,4)	125,0 (± 24,3)	102,8 (± 8,4)	105,7 (± 19,1)
<i>Crête pendant brûlage</i>	145,7 (± 19,2)	158,7 (± 20,5)	137,0 (± 11,1)	143,3 (± 18,9)
Coût cardiaque				
<i>Coût cardiaque absolu (CCA) (bpm)</i>	21,8 (± 14,8)	30,8 (± 17,1)	19,3 (± 10,4)	19,4 (± 14,3)
<i>Coût cardiaque relatif (CCR) (%)</i>	23,2 (± 16,9)	36,0 (± 21,4)	18,1 (± 9,9)	20,0 (± 15,1)
Extra pulsation cardiaque thermique	18,1 (± 10,8)	23,9 (± 16,7)	19,9 (± 6,2)	15,8 (± 8,8)
Pénibilité critère de CHAMOUX				
<i>Légère (%)</i>	57,1	33,3	50,0	66,6
<i>Lourde (%)</i>	42,9	66,6	50,0	33,3

Tableau 3 : Analyse des paramètres par postes dans le caisson

IV.5. Exemple d'analyse par poste pour un même SP par Polar Team ©

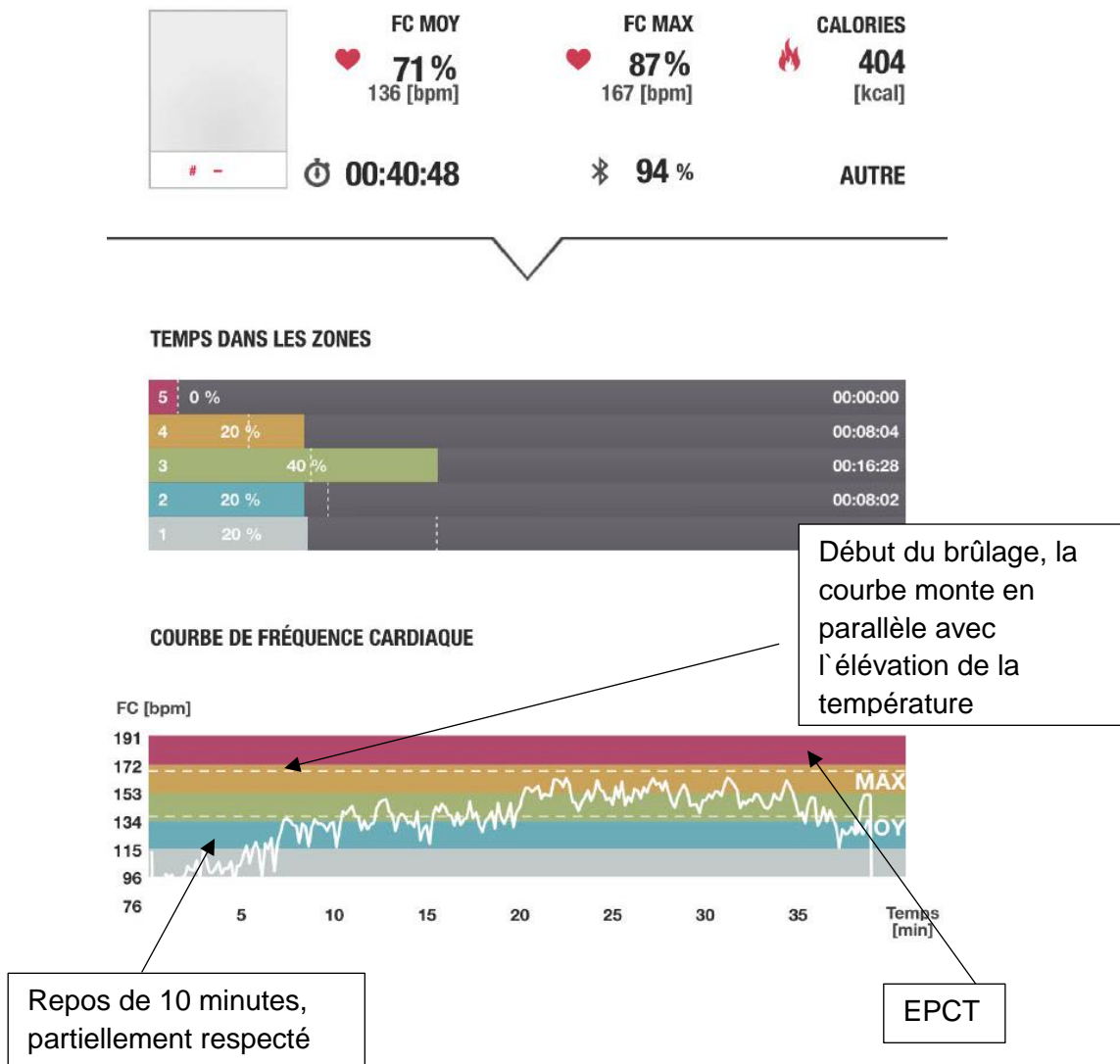
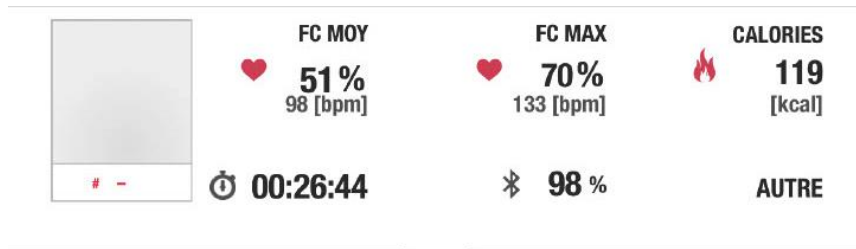


Figure 11 : Analyse Polar Team au poste F1 « Porte »



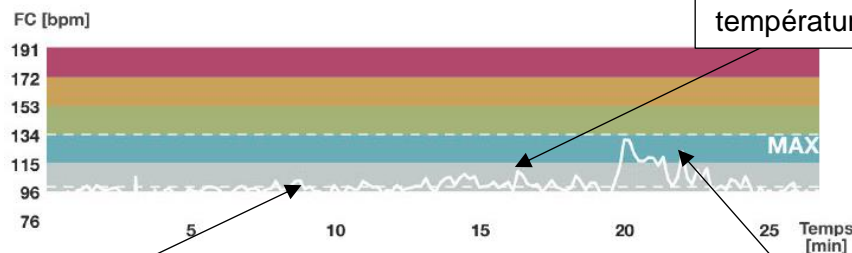
Figure 12 : Analyse Polar Team au poste F2 « Entrée »



TEMPS DANS LES ZONES



COURBE DE FRÉQUENCE CARDIAQUE



Début du brulage, la courbe monte en parallèle avec l'élévation de la température

Repos de 10 minutes assis respecté

EPCT

Figure 13 : Analyse Polar Team au poste F3 « Observateur »

V. Discussions

V.1. Principaux résultats

Au total, 6 sapeurs-pompiers sur les 7 présents lors des jours de brûlages ont participé à l'étude et 28 mesures de l'astreinte thermique ont pu être effectuées au cours de 5 sessions d'exercice au caisson de feu. L'analyse des différents paramètres mesurés lors des 5 exercices de brûlage mettait en évidence que la position F1 « à la porte de la chambre » était le poste le plus exposant (CCR = 36%) et avait été classé avec une pénibilité évaluée comme « lourde » selon les critères de CHAMOIX.

Concernant l'expérience en caisson, seuls les sapeurs-pompiers professionnels avaient déjà réalisé ce type d'entraînement. Même si cela nous ferait nous attendre d'avoir un niveau d'appréhension avant l'entrée en caisson plus élevé chez les volontaires, les résultats ont montré que les SPP et les SPV présentaient des niveaux d'appréhension similaires avant le premier brûlage. Cela peut s'expliquer, en partie, par l'esprit de compétition présents parmi les sapeurs-pompiers et par le fait qu'ils aient rempli les questionnaires de recueil de données personnelles dans la même pièce au même moment. Concernant le niveau de la condition physique, les SPP faisaient plus de sport par semaine que les SPV. Les SPP ont une très bonne condition physique parce qu'ils réalisent plus de 4 heure de sport par semaine et ils sont constamment sollicités sur le terrain. Les volontaires, à l'opposé, comptent moins de sorties et ont une condition physique plus proche de la moyenne de la population.

V.2. Limites de l'étude

Le principal point faible de cette thèse a été le nombre restreint de sapeurs-pompiers inclus dans l'étude. Cela réduit la puissance de ce travail. Nous avons constaté des biais importants dans la détermination de la fréquence cardiaque de repos. Étant donné que la préparation du caisson pour la journée se réalisait en premier lieu après l'arrivée des sapeurs-pompiers sur le site d'entraînement, il a été difficile de respecter, avant chaque brûlage, le repos de 10 minutes assis dans la salle de cours. Cela a généré des valeurs de fréquences cardiaque parfois très élevées, ayant pu avoir comme conséquence une sous-estimation dans le calcul du coût cardiaque relatif.

Une autre condition n'a pas toujours été respectée, il s'agissait de la pesée des sapeurs-pompiers, avant et après chaque brûlage. Le premier jours d'exercice, les SP ont enchainé deux brûlages avec une pause minime entre eux, sans avoir enlevé la tenue de feu. Il n'a pas été possible de les peser en sous-vêtements.

Nous avons également observé que, lors de la prise de la température tympanique à la sortie du caisson, les valeurs de la température étaient moins élevées chez les sujets examinés en dernier. Le changement d'embout de protection après chaque prise de température et la saisie manuelle des valeurs obtenues généraient une perte de temps qui pouvait diminuer la précision des valeurs des mesures déterminées.

Aucune femme n'a participé à notre étude. Leur inclusion aurait été intéressante puisque les femmes sont en général plus intolérantes à la chaleur que les hommes. (19)

Une autre source d'erreur a pu être de brèves pertes de connexion entre les ceintures et l'application polar, à cause de la fermeture complète des deux portes à l'entrée du caisson. Cette fermeture des portes a pu empêcher la transmission du signal Bluetooth, générant des coupures sur les traces de cardiofréquence-métrie.

V.3. Justification des mesures

La détermination de l'astreinte à la chaleur par l'indice de contrainte thermique WBGT n'a pas été utilisée parce que cet indice n'est pas applicable ni lorsque les indices de la contrainte thermique sont variables dans le temps, ni en cas d'expositions de courtes périodes. (19)

Les critères choisis pour la détermination de l'astreinte thermique chez les sapeurs-pompiers étaient objectifs (fréquence cardiaque, perte de poids, variations de la température tympanique) et subjectifs (la perception des conditions de chaleur du caisson).

Concernant la détermination de la fréquence cardiaque de repos, d'autres études ont utilisé, en mesures égales, la médiane des 6 heures de sommeil et la fréquence cardiaque des 5 minutes avant le travail. La médiane des 6 heures de sommeil a l'avantage de générer une fréquence cardiaque de repos suffisamment basse, pour générer des coûts cardiaques quel que soit le type de poste (P. Meunier, 2010). Bien que plus précise que la moyenne des fréquences cardiaques que repos assis avant le travail, la médiane des 6 heures de sommeil est plus difficilement applicable sur le plan pratique. Une autre méthode de calcul de la fréquence cardiaque de repos est celle du 1^{er} percentile de travail de la trace de cardiofréquence-métrie. Cette méthode nécessite un logiciel spécial dont nous ne disposons pas. Nous avons utilisé la fréquence cardiaque après 10 minutes de repos assis, grâce à sa simplicité d'application en plan pratique. Toutefois, nous avons observé que cette méthode a tendance à surestimer la valeur de la fréquence cardiaque de repos. Chez les sapeurs-pompiers émotifs, par exemple, la FC de repos se trouvait majorée par l'effet de blouse blanche. Aussi, la plupart du temps, les sapeurs-pompiers devaient accomplir des tâches physiques avant le début de l'exercice (préparation et le transport des palettes dans la

chambre de brûlage). Cela se traduisait, encore une fois, par une fréquence cardiaque de repos majorée.

En ce qui concerne la détermination des variations de la température, la plupart des études utilisaient la température rectale, qui est le gold-standard de la mesure de la température centrale. Cette méthode nécessite l'achat des capteurs ingérables, assez chers. Nous n'avons pas choisi cette méthode de mesure de la température corporelle d'une part, à cause de sa faible acceptabilité de la population, et à cause du prix du matériel nécessaire. Il est à noter aussi qu'en situation opérationnelle réelle, cette méthode de mesure de la température est également impraticable.

Nous avons utilisé la température tympanique, bien qu'elle soit moins précise que la température rectale. Ce site de mesure a l'avantage d'être accessible et les thermomètres à infra-rouge peuvent fournir des valeurs proches de la température centrale, si les conditions de prise de température sont respectées (température extérieure supérieure à 10 degrés Celsius). Toutefois, ce type de mesure a tendance à sous-estimer la température centrale et il a tendance à refléter plutôt les conditions de l'environnement que la température de la membrane tympanique. (25) La vasodilatation locale et le niveau de transpiration du conduit auriculaire peuvent également modifier les valeurs enregistrées. (25) Dans notre étude, la condition de température extérieure minimale nécessaire n'a pas été remplie tous les jours (le premier jour des brûlages, la température extérieure était à 7 degrés Celsius).

Concernant le logiciel utilisé pour extraire les données, nous avons utilisé l'application Polar Team qui permet la synchronisation de plusieurs ceintures pectorales à la fois, ainsi que l'affichage des enregistrements en temps réel. Cette application peut se télécharger uniquement sur une tablette Apple. Toutefois, elle ne calcule que la fréquence moyenne durant l'exercice, la fréquence cardiaque de crête, la fréquence cardiaque maximale théorique (calculée avec la formule d'Astrand) ainsi que l'aspect de la courbe de cardiofréquence-métrie. L'application qui permet d'avoir accès au fichier Excel avec les valeurs de la fréquence cardiaque toutes les 15 secondes est Polar Club, qui nécessite l'achat d'une licence sur l'application. Afin de déterminer les extra-pulsations cardiaques thermiques, nous avons utilisé une application qui permet l'enregistrement continu de l'écran de la tablette et nous avons noté l'heure de l'entrée et de sortie des sapeurs-pompiers du caisson, et la minute correspondant à la sortie sur l'enregistrement de la fréquence cardiaque sur l'application Polar Team. Une autre application testée était SquadHr, qui permettait avoir des chiffres d'enregistrement toutes les 15 secondes, sans avoir besoin d'une licence. Son désavantage était la tolérance limitée de la distance permissible afin de garder la connexion des ceintures (pour le Polar cette distance est de 60 mètres entre les ceintures et la tablette).

V.4. Température

L'élévation moyenne de la température tympanique a dépassé la limite de 1 °C, ce qui veut dire qu'il y existait une astreinte thermique. En sachant que l'INRS propose cette limite pour un poste de 8 heures de travail (19), afin de diminuer le risque de symptômes liés à la chaleur, il faut se rappeler qu'en condition d'incendie réel, la durée d'exposition est plus longue qu'en caisson. Toutefois, il y a eu des SP qui ont présentés une élévation de 1,0 °C, passant de 36,4 à 37,4°C, situation tout à fait acceptable. L'INRS a fixé le seuil de la température centrale à ne pas dépasser à 38 °C. (19) Dans notre étude, cette limite de température a été dépassée à plusieurs occasions chez les sujets occupant le poste à la porte et observateur. Les valeurs maximales des températures post-brulages atteintes, par ordre décroissante étaient de 37,6 °C à l'entrée, 38,5 °C au poste observateur et 38,9 °C à la porte. Cela suggère que l'astreinte thermique était plus importante chez les SP à la porte ce qui s'explique par l'exposition à des températures plus élevées que les autres postes. Le poste observateur, bien que moins sollicitant du point de vue physique, implique une exposition à des températures dépendant des phénomènes thermiques reproduits. Le poste à l'entrée implique une exposition à des températures moins élevées puisqu'il est davantage en contact avec le milieu extérieur du caisson, donc avec des températures plus basses.

V.5. Perte hydrique

Dans notre étude, la limite de 5% de perte de masse corporelle n'a pas été atteinte. Les sujets buvaient donc des volumes supérieurs aux pertes hydriques par sudation. Toutefois, les consignes de la mesure de la perte hydrique n'ont pas été toujours respectés. Pour avoir des valeurs correctes de la perte hydrique, nous aurions dû mesurer, en plus du poids avant l'entrée dans le caisson, la quantité d'eau consommée avant l'entrée, et de peser les sujets en sous-vêtements aussi à la sortie, avant qu'ils ne se réhydratent. Pour que cela soit plus facile à réaliser sur le plan pratique, nous aurions dû peser les sujets devant le caisson, (à noter que le premier jour des simulations il pleuvait et la température extérieure était de 7 °C).

V.6. Fréquence cardiaque

Les ceintures Polar se sont montrées pratiques et fiables pour enregistrer des fréquences cardiaques en continu pendant les entraînements en caisson. Dans notre étude, les limites des différents indices de pénibilité cardiaque ont été atteintes à multiples reprises. Concernant la fréquence cardiaque moyenne, les valeurs les plus élevées étaient enregistrées au poste à la porte, suivi du poste observateur et à l'entrée, de valeurs similaires. Si l'on prend en compte la limite de fréquence moyenne au poste de travail à ne pas dépasser, citée par l'INRS (19),

les trois postes dans le caisson ont généré des fréquences moyennes dépassant cette limite de 100 bpm chez l'homme.

En ce qui concerne la fréquence cardiaque de crête, la valeur la plus élevée (185 bpm) a été enregistrée sur un sujet à la porte. L'INRS préconise à ne pas dépasser la valeur de FC de crête de 145 bpm (homme et femme), plus de 5 minutes. (19) Dans notre étude, il était difficile d'apprécier la durée de temps pendant laquelle le sujet présentait cette valeur de crête. Si nous avons eu les valeurs des données enregistrées toutes les 15 secondes, nous aurions pu quantifier cette durée. Toutefois, nous avons pu apprécier les périodes d'efforts intenses, sur les enregistrements de fréquence cardiaque, représentées par des fréquences cardiaques plus élevées.

V.7. Indices de pénibilité cardiaque

Le poste ayant généré un CCR moyen le plus élevé était le poste de la « porte » (36%). Le CCR doit être inférieur à 30% sur un poste de travail de 8 heures. (20), Les deux autres postes n'ont pas dépassé, selon cette limite, le seuil maximal sur la journée de travail et reste des conditions de travail acceptable pour les SP.

V.8. L'acclimatation à la chaleur

Le phénomène de l'acclimatation signifie une meilleure réponse des phénomènes de la thermorégulation et se traduit par une diminution de la fréquence cardiaque et des températures centrales et cutanées moins élevées. Dans notre étude, les valeurs de la fréquence cardiaque moyenne ont diminué en fin de semaine pour les postes de la « porte » et à « l'entrée ». Nous avons constaté l'effet inverse pour le poste « observateur ». Une possible explication serait une meilleure maîtrise du feu en fin semaine des SP, et d'une élévation générale des températures dans le caisson en fin semaine (bien que cela aurait dû s'observer sur le reste des postes aussi). Une autre source d'erreur était la mesure de la fréquence cardiaque de repos. Une valeur erronée, plus augmentée que la valeur réelle de celle-ci, nous aurait donné des valeurs sous-estimées du cout cardiaque relatif moyen. Nous aurions pu améliorer cela, en soulignant l'importance du respect des consignes données par rapport au temps de repos de 10 minutes assis dans la salle de cours.

Conclusion

Les exercices au caisson de feu avec des personnels en bonne condition physique, permet de considérer que le risque lié à la chaleur était faible lors de ces exercices. Cependant, la surveillance de l'astreinte thermique et des contraintes cardiaques doivent être poursuivies par cardiofréquencemétrie sur un échantillon de sapeurs-pompiers plus important et une attention plus particulière pourrait être apportée chez les sapeurs-pompiers volontaires moins entraînés à ce type d'exercice et moins sportifs que les sapeurs-pompiers professionnels.

Références bibliographiques

1. Sapeurs-pompiers — Geneawiki [Internet]. [cité 9 janv 2024]. Disponible sur: https://fr.geneawiki.com/wiki/Sapeurs-pompiers?mobileaction=toggle_view_desktop
2. Pompiers.fr [Internet]. 2015 [cité 29 nov 2023]. Organisation des sapeurs-pompiers en France. Disponible sur: <https://www.pompiers.fr/pompiers/nous-connaître/organisation-des-sapeurs-pompiers-en-france>
3. L'organisation des services d'incendie et de secours (vitrine.L'organisation des services d'incendie et de secours) - XWiki [Internet]. [cité 12 déc 2023]. Disponible sur: <https://www.wikiterritorial.cnfpt.fr/xwiki/bin/view/vitrine/L%27organisation%20des%20services%20d%27incendie%20et%20de%20secours>
4. Service local d'incendie et de secours. In: Wikipédia [Internet]. 2023 [cité 13 déc 2023]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Service_local_d%27incendie_et_de_secours&oldid=208115282
5. Plaque-SDIS-87-2023.pdf [Internet]. [cité 29 mars 2024]. Disponible sur: <https://sdis-87.fr/wp-content/uploads/2023/03/Plaque-SDIS-87-2023.pdf>
6. AIR2018SA0066Ra.pdf [Internet]. [cité 29 mars 2024]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2018SA0066Ra.pdf>
7. Hydrocarbures aromatiques polycycliques et effets sur la santé • Cancer Environnement [Internet]. Cancer Environnement. [cité 8 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/hydrocarbures-aromatiques-polycycliques-hap/>
8. Lim CL. Fundamental Concepts of Human Thermoregulation and Adaptation to Heat: A Review in the Context of Global Warming. *Int J Environ Res Public Health*. 24 oct 2020;17(21):7795.
9. Cours-T2-CH3-Bilan-thermique-corps-humain883327602.pdf [Internet]. [cité 28 févr 2024]. Disponible sur: https://svt-a-feuillade.fr/pages/doc_TC_Prem/Cours-T2-CH3-Bilan-thermique-corps-humain883327602.pdf
10. Sommet A. <https://biologiedelapeau.fr>. 2013 [cité 7 févr 2024]. La thermorégulation. Disponible sur: <http://biologiedelapeau.fr/spip.php?article75>
11. Larousse É. thermorégulation - LAROUSSE [Internet]. [cité 6 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/thermor%C3%A9gulation/16553>

12. ambiancethermique.pdf [Internet]. [cité 25 mars 2024]. Disponible sur: <https://biotec.ac-dijon.fr/IMG/pdf/ambiancethermique.pdf>
13. Ambiances_thermiques_2013.pdf [Internet]. [cité 4 janv 2024]. Disponible sur: https://emploi.belgique.be/sites/default/files/content/publications/FR/Ambiances_thermiques_2013.pdf
14. Éco-construction d'un bâtiment à énergie positive - Confort thermique [Internet]. [cité 1 mars 2024]. Disponible sur: <https://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/co/grain.html>
15. Beswic [Internet]. 2015 [cité 25 mars 2024]. Ambiances thermiques. Disponible sur: <https://www.beswic.be/fr/themes/agents-physiques/ambiances-thermiques>
16. Coutarel F, Caroly S, Vézina N, Daniellou F. Marge de manœuvre situationnelle et pouvoir d'agir : des concepts à l'intervention ergonomique: Le travail humain. 20 févr 2015;Vol. 78(1):9-29.
17. Beswic [Internet]. 2016 [cité 31 mars 2024]. Indice WBGT de contrainte thermique à la chaleur. Disponible sur: <https://www.beswic.be/fr/themes/agents-physiques/ambiances-thermiques/indices-de-confort-et-de-contrainte-thermique/indice-wbgt-de-contrainte-thermique-la-chaleur>
18. Amiard V, Delanaud S, Libert JP. Analyse du travail à la chaleur : les indices de contraintes thermiques. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement. avr 2017;78(2):166-74.
19. Travailler dans une ambiance thermique chaude. 2019;
20. Lemoine JL, Vanheule S. Cardiofréquencemétrie et travail.
21. Caisson d'entraînement UIF conteneurisé | Contact CONTAINERZ [Internet]. [cité 23 janv 2024]. Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/expo/caisson-d-entrainement-uif-conteneurise-p332336469.html>
22. Allione CG, Honore CV, Ines CL. 12ème promotion F.A.E. chef de groupement.
23. Service départemental d'incendie et de secours d'Eure-et-Loir - Les moyens pédagogiques [Internet]. [cité 1 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.sdis28.fr/Les-moyens-pedagogiques>
24. Ergonomics. Evaluation of thermal strain by physiological measurements: [Internet]. BSI British Standards; [cité 30 janv 2024]. Disponible sur: <https://linkresolver.bsigroup.com/junction/resolve/00000000030111327?restype=standard>

25. Tympanic Temperature - an overview | ScienceDirect Topics [Internet]. [cité 5 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/topics/nursing-and-health-professions/tympanic-temperature>
26. Pompier en France. In: Wikipédia [Internet]. 2023 [cité 29 nov 2023]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pompier_en_France&oldid=209428148#Professionnels
27. ISO-10551-2019.pdf [Internet]. [cité 4 janv 2024]. Disponible sur: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/67186/4135c377a60848089fe493ed2c4776b7/ISO-10551-2019.pdf>
28. RMO caisson V2022.pdf [Internet]. [cité 23 janv 2024]. Disponible sur: https://enasis.fr/pluginfile.php/14667/mod_resource/content/2/RMO%20caisson%20V2022.pdf
29. Dessureault PC, Doucet M. Évaluation des indices de contrainte thermique en mines profondes.
30. ue3-thermo-paces-24sept12.pdf [Internet]. [cité 6 févr 2024]. Disponible sur: <http://medecine-pharmacie.univ-fcomte.fr/download/ufr-smp/document/cours-paces/ue3-thermo-paces-24sept12.pdf>
31. Beswic [Internet]. 2016 [cité 31 mars 2024]. Indice PHS de contrainte thermique à la chaleur. Disponible sur: <https://www.beswic.be/fr/themes/agents-physiques/ambiances-thermiques/indices-de-confort-et-de-contrainte-thermique/indice-phs-de-contrainte-thermique-la-chaleur>
32. 2019 - Travailler dans une ambiance thermique chaude.pdf.
33. Lemoine et Vanheule - Cardiofréquencemétrie et travail.pdf [Internet]. [cité 1 avr 2024]. Disponible sur: <http://gemsto.free.fr/RepriseaccCV25sept15/Cardiofreqmetrie.-25sept15.SVanheule.pdf>
34. Caisson-feu.pdf [Internet]. [cité 1 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.centre-formation-securite.fr/wp-content/uploads/Caisson-feu.pdf>
35. Allione et al. - 12ème promotion F.A.E. chef de groupement.pdf [Internet]. [cité 1 avr 2024]. Disponible sur: https://crd.ensosp.fr/doc_num.php?explnum_id=7895

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire

Serment d'Hippocrate

En présence des maîtres de cette école, de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine.

Je dispenserai mes soins sans distinction de race, de religion, d'idéologie ou de situation sociale.

Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser les crimes.

Je serai reconnaissant envers mes maîtres, et solidaire moralement de mes confrères. Conscient de mes responsabilités envers les patients, je continuerai à perfectionner mon savoir.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné de jouir de l'estime des hommes et de mes condisciples, si je le viol et que je me parjure, puissé-je avoir un sort contraire.





Evaluation de l'astreinte thermique des sapeurs-pompiers de Limoges par cardiofréquencemétrie lors des entrainements en caisson de feu.

Résumé :

Contexte : la mission de lutte contre les incendies implique une activité physique intense réalisée par les sapeurs-pompiers dans des conditions environnementales extrêmes. Les contraintes physiologiques liées à la chaleur, à l'effort physique et aux vêtements de protection les exposent aux accidents liés à la chaleur. Le caisson feu est un dispositif permettant aux sapeurs-pompiers de s'entraîner dans des conditions ressemblant à la réalité en reconstituant les phénomènes thermiques.

Objectif : évaluer l'astreinte thermique des sapeurs-pompiers professionnels ou volontaires de Limoges pendant les entraînements en caisson de feu.

Méthodes : il a été réalisé une étude préliminaire transversale sur un échantillon de sapeurs-pompiers du SDIS 87 sur une période de 5 jours, du 10 au 15 mars 2024. Il s'agissait d'effectuer des mesures répétées des astreintes thermiques et des contraintes cardiaques chez des sapeurs-pompiers professionnels ou volontaires lors de session d'entraînements dans un caisson de feu d'observation. La fréquence cardiaque a été enregistrée avant, pendant et après l'exercice avec un cardiofréquencemètre de type ceinture pectorale Polar H10. La mesure de l'astreinte thermique et des contraintes cardiaques ont été mesurées par le calcul du coût cardiaque relatif et des extra pulsations cardiaques thermiques.

Résultats : au total, 6 sapeurs-pompiers sur les 7 présents lors des jours de brûlages ont participé à l'étude et 28 mesures de l'astreinte thermique ont pu être effectuées au cours de 5 sessions d'exercice au caisson de feu. L'analyse des différents paramètres mesurés lors des 5 exercices de brûlage mettait en évidence que la position F1 « à la porte de la chambre » était le poste le plus exposant (CCR = 36%) et avait été classé avec une pénibilité évaluée comme « lourde » selon les critères de CHAMOIX.

Conclusion : les exercices au caisson de feu, durant en moyenne 16 minutes avec des personnels en bonne condition physique, permet de considérer que le risque lié à la chaleur était faible. Cependant, la surveillance de l'astreinte thermique et des contraintes cardiaques doivent être poursuivies par cardiofréquencemétrie sur un échantillon de sapeurs-pompiers plus important et une attention plus particulière pourrait être apportée chez les sapeurs-pompiers volontaires moins entraînés à ce type d'exercice et moins sportifs que les sapeurs-pompiers professionnels.

Mots-clés :

Astreinte thermique, cardiofréquencemétrie, coût cardiaque relatif, Santé au travail, sapeur-pompier.