

Refroidissement de la fumée et techniques de lances

Une étude documentaire



Institut néerlandais pour la sécurité publique
P.O. Box 7010
6801 HA Arnhem
Pays-Bas

Kemperbergerweg 783
Arnhem, Pays-Bas

www.nipv.nl

info@nipv.nl

+31 (0)26 355 24 00

NdT : Ce document est une traduction d'une analyse publiée par un organisme référent des pays bas décrivant des techniques qui sont propres à ce pays et des recherches permettant de comparer d'autres techniques d'autres pays ou organismes référents et que pour l'heure, en France seules les techniques de lances décrites dans le GTO ETEX peuvent être utilisées en formation et sur opération.

Détails de la publication

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2022

Auteur	R. Weewer
Contact	R. van den Dikkenberg
Traduction française	A. Piquet, merci à K. Lambert, T. Levasseur et F. Gaviot-blanc
Commandité par	Professorship of Fire Service Science
Date	25 septembre 2022

Comme nous attachons une grande importance au partage des connaissances, certaines parties de cette publication peuvent être reproduites à condition d'en indiquer la source.

L'Institut néerlandais pour la sécurité publique a été créé par la loi sous le nom d'Instituut Fysieke Veiligheid (Institut néerlandais pour la sécurité).

Résumé

Les techniques de lances, les débits et, plus particulièrement, la manière la plus sûre et la plus simple de refroidir la fumée font l'objet de débats dans le monde entier. Une question importante à cet égard est donc de savoir s'il existe une technique facile à mettre en œuvre et qui fonctionne toujours. Les avis des experts étant très divergents, l'Académie des sapeurs-pompiers a mené une étude de terrain sur l'effet des différentes techniques. La conclusion de ces recherches sur le terrain est que la "méthode de l'arc" remplit ces conditions. Cela a immédiatement donné lieu à une discussion sur la question de savoir si cette méthode était sûre en toutes circonstances, compte tenu de la production présumée de vapeur. Pour répondre à cette question, cette analyse documentaire a été réalisée.

La question principale de l'analyse documentaire est la suivante :

Que peut-on trouver dans la littérature internationale sur les applications des différentes techniques de lances et les risques liés aux différentes techniques, notamment pour le refroidissement de la fumée dans les petites pièces lors d'une attaque intérieure offensive ?

On trouve très peu de recherches expérimentales sur l'application des différentes techniques de refroidissement des fumées dans la littérature. Étant donné que différentes techniques et circonstances sont présentées dans les discussions et dans les expériences sans qu'il y ait une structure claire, il n'est pas possible d'arriver à une conclusion claire et nette. La génération de vapeur semble être le plus grand risque, bien qu'il ne soit pas clair dans quelle mesure il s'agit d'un problème réel puisqu'aucune recherche sur le terrain n'a été menée à ce sujet.

S'il est vrai qu'une grande quantité de vapeur est générée lorsqu'une grande quantité d'eau est appliquée sur des surfaces chaudes, l'option la plus sûre sera de s'assurer qu'il y ait un sortant ou de rester à l'écart de l'écoulement. Cependant, il n'est pas clair dans quelle mesure la surpression et l'écoulement sont créés par la vapeur. La mesure dans laquelle la couche de fumée se contracte ou s'étend réellement n'est pas claire non plus. Il existe cependant des preuves que la formation de vapeur dépend du débit et des circonstances (dans les conteneurs de formation en acier, le comportement diffère de la pratique).

L'application de débits optimaux semble être plus importante que la technique de lance appliquée.

Sommaire

	Résumé	3
	Introduction	5
1	Définitions	7
1.1	Vapeur et vapeur d'eau	7
1.2	Formes dans lesquelles l'eau est libérée par une lance	8
1.3	Méthodes d'extinction de l'incendie (attaque)	8
1.4	Méthodes d'approche du feu (progression intérieure)	9
2	Techniques de refroidissement de la fumée	11
2.1	Résultats généraux	11
2.2	Recherche expérimentale	11
2.3	Critiques	16
2.4	Documents de réflexion	16
2.5	Livres sur la lutte contre les incendies	17
2.6	A propos de la vapeur	20
2.7	À propos des débits	21
2.8	Le rôle des sortants	21
3	Discussion	23
3.1	Réponses à la question principale et aux sous-questions	23
3.2	Vue d'ensemble	25
	Bibliographie	27

Introduction

Contexte

Selon les principes de base de la lutte contre l'incendie, le refroidissement de la fumée est nécessaire si une attaque intérieure doit être menée dans un petit bâtiment ou une pièce enfumée, car le jet d'eau ne peut pas atteindre directement le foyer. La fumée est refroidie par mesure de sécurité pendant la progression vers le foyer. Le refroidissement de la fumée diminue la chaleur (convection et rayonnement) à laquelle les pompiers sont exposés et réduit le risque d'inflammation de la fumée.

Les techniques de lances, les débits et, plus précisément, la manière la plus sûre et la plus simple de refroidir la fumée font l'objet de débats dans le monde entier. Ces débats ont lieu lors de conférences, sur les médias sociaux et dans les magazines. Les textes sont souvent basés sur l'expérience et ont tendance à être des opinions plutôt que des connaissances scientifiquement étayées. Une déclaration couramment entendue dans ce contexte est "ça dépend", indiquant que différentes techniques sont disponibles, en fonction du moment réel et de la situation en question. Pour que les pompiers puissent décider de la méthode de refroidissement de la fumée appropriée sous la pression du temps, ils doivent disposer de toutes les techniques (outils), de toutes les informations nécessaires, ainsi que des connaissances pertinentes et de la conscience de la situation. Cela semble être une tâche impossible, même s'ils ont eu beaucoup de temps pour s'entraîner et s'exercer, car certaines informations pertinentes nécessaires pour prendre la bonne décision sur une base théorique feront toujours défaut.

Une question importante à cet égard est donc de savoir s'il existe une technique facile à mettre en œuvre et qui fonctionne toujours. Les avis des experts étant très divergents, l'Académie des sapeurs-pompiers a mené une étude de terrain sur l'effet des différentes techniques (Académie des sapeurs-pompiers, 2021). La conclusion de cette recherche sur le terrain était que la "méthode de l'arc" remplissait ces conditions. Cela a immédiatement conduit à une discussion sur la question de savoir si cette méthode serait sûre en toutes circonstances, compte tenu de la production présumée de vapeur. Pour répondre à cette question, on a procédé à cette analyse documentaire et on a recherché dans la littérature internationale des textes et des recherches sur le sujet du refroidissement des fumées. Ce document fournit un résumé de ce qui a été trouvé dans la littérature à cet égard.

Objectif

L'objectif de cette analyse documentaire est de répondre à la question de savoir s'il existe une technique de refroidissement de la fumée facile à mettre en œuvre et qui peut toujours être appliquée en toute sécurité lors d'une attaque intérieure offensive dans une pièce enfumée. Une question secondaire est de savoir quel risque serait encouru si les pompiers néerlandais appliquaient systématiquement la méthode de l'arc avec un jet droit lorsqu'ils progressent vers le foyer dans un petit bâtiment ou une petite pièce, si le foyer ne peut pas être éteint directement.

¹ La méthode de l'arc est une technique de lance qui consiste à appliquer un jet d'eau droit sur les murs et le plafond. Le jet décrit une forme en "n".

Question de recherche

La question principale de l'analyse documentaire est la suivante :

Que peut-on trouver dans la littérature internationale sur les applications des différentes techniques de lances et les risques liés aux différentes techniques, notamment pour le refroidissement de la fumée dans les petites pièces lors d'une attaque intérieure offensive ?

Les sous-questions sont :

1. Quelles sont les techniques de lances qui existent et à quoi servent-elles ?
2. Quelles études expérimentales ont été menées sur les effets de ces techniques ?
3. Quels sont les avantages et les inconvénients des techniques appliquées pour refroidir la fumée et quels sont les risques identifiés dans la littérature ?

Approche

La méthode boule de neige a été appliquée à cette analyse documentaire. L'analyse documentaire du rapport de recherche UL-FSRI *Fire Attack* (UL-FSRI, 2020) a servi de point de départ. Les sources ont été remontées jusqu'en 1950, date à laquelle la recherche la plus ancienne a été publiée par Lloyd Layman (Layman, 1952). L'étape suivante a consisté à séparer les articles entre ceux basés sur la recherche et ceux basés sur des références à la recherche. Les articles d'opinion ou de réflexion ont été étudiés, mais ne sont pas discutés, sauf s'ils contenaient des affirmations intéressantes. En outre, avec l'aide d'experts consultés par téléphone, on a cherché à savoir ce que l'on entend par les différentes techniques et ce qui est dit sur leur application.

Portée et structure du présent document

Cette analyse documentaire se concentre spécifiquement sur la recherche expérimentale de différentes techniques de lances servant à refroidir la fumée, et sur les effets positifs et négatifs de ces techniques. Comme il est apparu au cours de la recherche que les définitions des termes utilisés étaient très importantes pour comparer les techniques, des définitions ont également été recherchées et ont été incluses dans cette analyse documentaire. Il ne fait aucun doute qu'il existe de nombreux autres livres et documents sur le sujet des techniques de lances. Cette recherche a principalement pris en compte les documents sources et n'a pas tenu compte des revues et de la littérature dans lesquelles des opinions étaient exprimées.

Le chapitre 1 traite des définitions trouvées. Le chapitre 2 décrit ensuite les résultats de l'analyse documentaire et le chapitre 3 est consacré à la réflexion sur nos résultats et aux réponses aux questions principales et secondaires.

1 Définitions

Comme plusieurs termes et concepts sont utilisés avec des significations différentes dans la littérature, un résumé des termes et définitions pertinents est donné ci-dessous.

1.1 Vapeur et vapeur d'eau

Les pompiers utilisent souvent le mot "vapeur". Comme il n'est pas toujours évident de savoir s'ils veulent parler d'eau sous forme gazeuse ou de vapeur d'eau, une définition claire s'impose ici.

Zevotek (2017)

La "vapeur" ne peut pas être vue. Le nuage que la plupart des gens appellent vapeur est de l'humidité ou de la vapeur d'eau qui s'est condensée en gouttelettes d'eau " (Zevotek, 2017, p. 104).

Cela signifie que :

- > La vapeur est de l'eau sous forme gazeuse qui n'est pas transparente > 100 C°.
- > Vapeur d'eau = eau sous forme de vapeur qui n'est pas transparente < 100C°.

NFPA1700

La norme NFPA 1700 ne donne pas de définition de la vapeur ; elle utilise ce terme pour les deux formes sous lesquelles l'eau peut se présenter.

Wikipedia

Wikipedia définit trois types de vapeur : la vapeur humide, saturée et surchauffée.

- > On considère que la *vapeur humide* est de la vapeur dans laquelle flottent des particules d'eau. Si la vapeur humide est chauffée, ces particules d'eau s'évaporent en premier. Si la vapeur est suffisamment chauffée, elle devient saturée sèche.
- > *La vapeur saturée* est définie comme suit : vapeur qui se condense si la température est abaissée.
- > *Vapeur surchauffée* : La vapeur surchauffée est créée en ajoutant une chaleur supplémentaire à la vapeur.

Selon Wikipédia, en physique, la *vapeur d'eau* est de l'eau en phase gazeuse. En chimie, la vapeur d'eau est désignée par H₂O(g). Tout comme de nombreuses autres substances sous leur forme gazeuse, la vapeur d'eau dans l'air ne peut être détectée par l'œil humain. Wikipedia poursuit : "La quantité de volume de vapeur d'eau par unité d'air est l'humidité. Une diminution de la température de l'air entraîne la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes liquides et visibles, car l'air plus froid peut contenir moins de molécules d'eau ; lorsque le point de rosée est atteint, l'air est saturé de molécules d'eau qui s'agglutinent alors pour former de la brume ou des nuages."

Il semble y avoir une différence entre ce que l'on entend par vapeur en physique et son sens populaire. Les définitions suivantes seront utilisées dans ce document.

Vapeur humide : un mélange de vapeur et de gouttelettes d'eau qui n'est pas transparent ; l'eau s'est condensée.

Vapeur sèche : eau (invisible) en phase gazeuse.

1.2 Formes dans lesquelles l'eau est libérée par une lance

Jet brouillard

Une lance spécialement utilisée pour produire des gouttelettes très fines. C'est différent d'un jet reconstitué.

Jet reconstitué (NdT : Jet se rapprochant du jet diffusé d'attaque étroite ou large proposé par les lances utilisées majoritairement en France)

Les gouttes d'un jet reconstitué sont plus grosses que les gouttes d'un jet brouillard.

Jet droit

Un jet plein rectiligne appliqué à l'aide d'une lance combinée ou d'une lance "à ajustage lisse".

1.3 Méthodes d'extinction de l'incendie (attaque)

La littérature fait la distinction entre l'extinction de l'incendie et l'approche du foyer de l'incendie (progression intérieure). Il existe deux méthodes pour éteindre un incendie : la méthode directe et la méthode indirecte. Ces deux méthodes sont expliquées plus en détail dans cette section.

Méthode directe ou attaque directe :

- > Appliquer de l'eau directement sur la substance en feu (combustible) (Zevotek, 2017 ; NFPA1770, 2021).
- > Éteindre le feu directement en refroidissant la surface du combustible (en utilisant un jet plein à débit limité, également appelé méthode de crayonnage ou de badigeonnage) (Lambert & Baaij, 2011).

Méthode indirecte ou attaque indirecte :

- > L'application d'un jet d'eau au plafond pour produire beaucoup de vapeur, refroidissant à la fois les surfaces et la fumée (Zevotek, 2017). Il n'est en fait pas clair si cela concerne la vapeur humide ou sèche, mais, étant donné la teneur du rapport, il s'agit probablement de vapeur humide.
- > Un jet d'eau est appliqué sur les murs et le plafond de la pièce depuis l'extérieur de la pièce afin de générer autant de vapeur que possible [NFPA1700, 2021].
- > Combattre un incendie en créant autant de vapeur que possible dans la pièce en appliquant un jet reconstitué, avec un angle de cône de 30 à 60 degrés, sur les surfaces chaudes (le plafond) (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018). Il doit être appliqué depuis l'extérieur du foyer.
- > Éteindre les flammes (et puis noyer) en mouillant les surfaces chaudes (en appliquant un jet reconstitué) afin de créer de la vapeur. La pièce doit de préférence rester fermée. Utilisez cette méthode lorsqu'une attaque intérieure est difficile. Si cette méthode est appliquée à l'intérieur d'un bâtiment, elle ne doit pas être appliquée dans le foyer proprement dit, à moins qu'il y ait un circuit aéraulique sortant derrière le foyer (Lambert & Baaij, 2011).
- > Application d'un jet brouillard pour créer autant de vapeur que possible (Layman, 1952). Étant donné que les attaques intérieures n'étaient pas pratiquées à l'époque où Layman a écrit ces lignes, il s'agit d'une *attaque extérieure* à l'aide d'un "jet brouillard", c'est-à-dire d'une lance en mode pulvérisé avec des gouttelettes de la plus petite taille possible. Plus tard, cette méthode a également été utilisée à l'intérieur des bâtiments, mais cela présente des inconvénients. (Fredericks, 2000).
- > Diriger un jet droit vers le plafond ou les murs afin de le fragmenter en gouttes qui tombent ensuite sur la surface brûlante par cette voie est également appelé de nos jours "extinction indirecte". On ne la trouve pas dans la littérature, mais elle ressemble à la première étape (attaque extérieure) de l'attaque transitoire décrite dans le rapport de Underwriters Laboratories (Zevotek, 2017).

Attaque combinée

- > Une combinaison d'une attaque directe et d'une attaque indirecte (Zevotek, 2017)).
- > Une attaque combinée (appelée attaque indirecte dans de nombreux pays) est une combinaison d'une attaque indirecte et d'une attaque directe, souvent appelée "attaque massive". Elle est utilisée sur un feu pleinement développé où une grande quantité de vapeur est d'abord produite afin d'assurer le déclin, après quoi le foyer de l'incendie est éteint (Lambert & Baaij, 2011).

1.4 Méthodes d'approche du foyer (progression intérieure)

Il existe plusieurs possibilités pour s'approcher en toute sécurité du foyer de l'incendie (NFPA1700, 2021). Elles seront discutées ci-dessous.

Application d'un jet droit

Il existe deux méthodes qui utilisent un jet droit :

- > Un jet droit est appliqué sur les surfaces de la pièce pour les refroidir et leur permettre d'absorber à nouveau l'énergie de la couche de fumée.
- > Un jet droit est appliqué au plafond où le jet se brise en gouttes, les gouttes se déplacent à travers la fumée, les refroidissant grâce à l'évaporation de tout ou partie des gouttes d'eau.

La vapeur générée par le refroidissement du plafond et des gaz chauds absorbe de l'énergie supplémentaire car la vapeur est surchauffée.

Refroidissement de la fumée

En général, le terme de refroidissement de la fumée est utilisé pour désigner l'introduction de gouttelettes d'eau dans la couche de fumée. Les gouttelettes d'eau s'évaporent et extraient l'énergie de la fumée, refroidissant ainsi la fumée.

- > La vapeur générée refroidit la fumée qui se contracte et se dilue, ce qui entraîne une réduction de l'inflammabilité et du rayonnement (NFPA1700, 2020).
- > Le refroidissement de la fumée doit être un processus continu ; car il crée une bulle autour de l'équipe mais son impact est moindre dans les grands volumes (Zevotek, 2017).

Refroidissement de la fumée à l'aide d'impulsions et d'un jet reconstitué (refroidissement 3D) :

Refroidir la fumée afin de progresser en toute sécurité vers le foyer de l'incendie. Ces techniques sont importantes si le foyer de l'incendie ne peut être atteint directement. Toute la littérature pertinente fait référence à l'application d'impulsions et d'un jet reconstitué (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018, Lambert & Baaij, 2011). Les impulsions peuvent être courtes ou longues. La capacité de refroidissement des impulsions courtes et donc leur portée sont faibles. Les impulsions longues sont plus courantes de nos jours (plus grande capacité de refroidissement, plus grande portée). Une impulsion longue correspond à un angle de cône de 30 degrés et la lance est dirigée vers le plafond à un angle de 45 degrés. On dispose de peu d'informations sur les techniques de refroidissement de la fumée en fonction du volume de la pièce. On mentionne une surface au sol de 70m² maximum avec une hauteur de plafond normale (4 mètres maximum) (Lambert & Baaij, 2011).

1.4.1 Méthode préférée selon la norme NFPA1700

La NFPA approuve la méthode du jet droit comme technique préférée et la méthode du jet brouillard 3D comme alternative.

En ce qui concerne la technique recommandée utilisant le jet droit, la NFPA précise :

- > que la portée du jet doit être utilisée afin de refroidir le plafond loin devant le porte lance
- > que le jet doit être balayé sur la surface
- > que la fréquence et la quantité d'eau dépendent de l'intensité du feu, de la température des fumées, de la taille de la pièce, de l'emplacement et de la distance par rapport au foyer.

Une considération tactique soulignée dans la norme NFPA 1700 est que l'eau doit évidemment toujours être appliquée sur le feu aussi rapidement que possible. La condition préalable est que la réduction de la ventilation par le contrôle des portes augmente l'efficacité du refroidissement de la fumée, mais qu'une ventilation coordonnée est nécessaire dès que l'eau est appliquée sur le foyer. Ce que l'on entend probablement par-là, c'est que l'ouverture de la porte crée une sortie pour l'énergie (sous forme de vapeur).

1.4.2 Autres termes et méthodes

D'autres termes ont été trouvés dans la littérature, à savoir le refroidissement de surface et la méthode de l'arc.

Refroidissement des surfaces « surface cooling »

Il s'agit d'un de ces termes qui peuvent prêter à confusion. La première définition de ce terme est qu'il s'agit d'une méthode *pour éteindre le feu* ; la seconde définition est celle d'une méthode *pour refroidir la fumée* si le foyer de l'incendie ne peut être atteint directement. Il convient de faire la distinction entre ces deux définitions car les objectifs diffèrent.

Les significations suivantes ont été trouvées :

- > Refroidir la surface du foyer (Särqvist) (on peut aussi parler de "méthode directe").
- > Une forme de refroidissement de la fumée utilisant un jet reconstitué avec un petit angle de cône ou un jet droit dans un motif rapide en forme de O, T, Z ou n (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018) afin de contrôler l'inflammabilité des fumées, le rayonnement et le taux de dégagement de chaleur jusqu'à ce que l'eau puisse être effectivement appliquée à la source. Il ne s'agit pas d'une méthode d'extinction de l'incendie mais d'un moyen de progresser en toute sécurité vers le foyer. Selon Fire Dynamics Curriculum Portal (2018), les fumées sont pour ainsi dire déplacés en avant de la position de l'opérateur. En fait, l'idée que le refroidissement de la fumée permet de contrôler le taux de dégagement de chaleur est un peu étrange. Il s'agit probablement d'empêcher la fumée de s'enflammer et donc d'empêcher l'énergie d'être libérée par la fumée.

Méthode de l'arc « arc method »

La méthode de l'arc peut être appliquée à un incendie contrôlé par la ventilation. Il s'agit d'une méthode impliquant une impulsion de 2 à 3 secondes à un angle de cône de 40 à 60 degrés qui atteint également le plafond et les murs (Lambert & Baaij, 2011).

Il s'agit d'une définition de la méthode de l'arc différente de celle utilisée dans la recherche de la Fire Service Academy (Fire Service Academy 2021).

2 Techniques de refroidissement de la fumée

2.1 Conclusions générales

Relativement peu de littérature scientifique sont disponible sur le sujet du refroidissement de la fumée en relation avec les techniques de lances. Les articles trouvés sont pour la plupart des articles de synthèse (Liu et al., 2002) ou des articles dans lesquels les auteurs donnent leur avis ou leur expérience. La plupart des articles d'opinion ont été ignorés pour ce rapport, mais certains d'entre eux ont été utilisés lorsqu'ils apportaient des informations supplémentaires, par exemple sur le livre écrit par Layman, voir ci-dessous (Whitley, 2011 ; Taylor, 2011, Zevotek et al., 2017 ; Cool, 2005). À l'exception du livre de Layman (Layman, 1952), seules deux études expérimentales ont été trouvées sur l'effet des techniques de lances sur le refroidissement de la fumée (Naval Research Laboratory, 1997 ; Knapp, Pillsworth & White, 2003). Cependant, certaines analyses de données ou simulations informatiques ont été réalisées (Särqvist & Holmstedt, 2001 ; Maait Tsuomisaari, 1995).

Certains articles décrivent l'effet attendu de certaines techniques sur la base d'une analyse théorique. Pratiquement toutes les dissertations commencent par le livre de Lloyd Layman dans lequel il aurait décrit certaines expériences. Cependant, ce livre n'est pas disponible aux Pays-Bas² et n'a donc pas été étudié pour ce rapport (Layman 1952). Ce qu'il y aurait décrit ne peut donc être déduit que de sources indirectes (Fredericks, 2000 ; Whitley, 2011).

Outre les documents mentionnés ci-dessus, il existe des documents d'étude destinés au personnel des services d'incendie, qui décrit plusieurs techniques différentes et leurs objectifs. Ces documents sont basés sur l'expérience et les connaissances d'un grand groupe d'experts internationaux (Fire Dynamics Portal, 2014). Dans cette étude, les noms utilisés pour les différentes techniques suggèrent parfois autre chose que ce qui est prévu. Pour éviter toute confusion, il est important d'utiliser les termes et définitions corrects.

2.2 Recherche expérimentale

Relativement peu de recherches expérimentales ont été menées sur l'utilisation de différentes techniques de lances. La première série d'expériences de recherche concernant le refroidissement de la fumée sont les expériences décrites par Lloyd Layman. Le rapport sur l'une de ces séries d'expériences ne peut être retrouvé (Layman, 1952). La seule chose que l'on sait de ces expériences est qu'elles ont été menées à l'intérieur d'un navire. Pour le reste, il n'existe que des documents faisant référence à sa "méthode indirecte". Un autre groupe de recherche a réalisé des expériences avec différentes techniques de lances dans un conteneur en acier (Knapp et al, 2003). Un bon résumé de la littérature disponible jusqu'en 2002 peut être trouvé dans un rapport du Conseil national de recherches du Canada (Liu et al, 2002) et une revue concise dans le récent rapport de Underwriters Laboratories / Fire Safety Research Institute (Zevotek et al 2017). D'autres expériences ont été menées par le Centre de recherche navale du Canada (Scheffey, 1996), également à bord d'un navire. Le rapport en question n'étant pas clair et ne pouvant être retrouvé dans son intégralité, il ne sera pas traité plus avant dans le présent document.

² Le livre original n'a pas été recherché car suffisamment d'auteurs ont écrit à son sujet et l'importance des expériences pour les besoins de cette recherche a été considérée comme trop faible pour justifier l'effort requis pour obtenir l'original.

Avant de discuter des études disponibles, nous nous intéresserons d'abord au livre écrit par Layman.

2.2.1 Layman (1952)

Plusieurs auteurs (Zevotek, 2017) ; Fredericks, 2000, Axelsson, 2016, Taylor & Whitley, 2011) font référence à Lloyd Layman comme l'un des premiers auteurs à avoir abordé le sujet des jets brouillard. Il a appelé sa méthode la "méthode indirecte". Layman a développé sa méthode à travers des expériences à l'intérieur d'un navire. Les attaques à l'intérieur n'étaient pas réalisées à l'époque, car la protection respiratoire n'était pas encore disponible. L'idée générale était de créer autant de vapeur que possible dans la chambre de combustion en appliquant un jet brouillard provenant de l'extérieur de la pièce où se trouve le foyer, et de préférence de l'extérieur du bâtiment à travers une fenêtre brisée ou dans le cas d'un incendie pleinement développé, sur le foyer. L'hypothèse était que la grande capacité de refroidissement des gouttelettes éteindrait le feu (Layman, 1952 ; Fredericks, 2000). On dit qu'il a ensuite implicitement étendu cette méthode pour l'utiliser lors d'une attaque intérieure, mais depuis l'extérieur de la pièce où siège le foyer.

Fredericks (Fredericks, 2000) décrit plus en détail les circonstances dans lesquelles cette "attaque indirecte" a été diffusé par Layman. Il s'agissait d'utiliser un jet brouillard dans une attaque extérieure dans un bâtiment fermé. Il n'est pas clair si une lance spéciale avec des gouttelettes très fines a été utilisée à cette fin. Nous devrions considérer ceci dans le contexte du faible niveau de protection personnelle de cette époque, qui rendait une attaque intérieure pratiquement impossible. Comme le décrit Fredericks, cette tactique ressemble fortement à ce que nous appellerions aujourd'hui une attaque extérieure offensive utilisant des fognails ou des coldcutters. Donc, dans ce sens, Layman était vraiment en avance sur son temps. Selon Frederick, il est clair que Layman n'a jamais voulu que cette tactique soit appliquée dans le cadre d'une attaque intérieure et Layman déclare littéralement dans son livre : "Une attaque indirecte doit toujours être effectuée à partir de positions qui permettront au personnel d'éviter les blessures causées par la fumée surchauffée et la vapeur vive. Si cela est possible et pratique, l'attaque indirecte doit être effectuée à partir de positions situées à l'extérieur du bâtiment concerné" (Fredericks, 2000, p. 64). Il s'agit d'une condition importante pour l'application de la méthode Layman : elle doit toujours être mise en œuvre à partir d'une position où l'opérateur de la lance ne se trouve pas dans la trajectoire de l'écoulement des gaz chauds et de la vapeur, elle doit donc être réalisée de préférence comme une attaque extérieure.

Discussion sur la méthode Layman

Étant donné que plusieurs auteurs ont fait référence à la recherche expérimentale de Layman et à sa transposition dans la pratique de la lutte contre les incendies, il pourrait être intéressant d'examiner de plus près ce qu'il voulait à l'origine et ce qui est actuellement dit et écrit à ce sujet.

M. Rosander peut être considéré comme l'un des pères fondateurs des techniques d'impulsion suédoises. Dans une interview avec Lars Axelsson (Axelsson, 2016), Rosander a soutenu, que les techniques d'impulsion à jet reconstitué étaient plus sûres que la méthode Layman qui était couramment utilisée en Suède à l'époque (mais qui n'était pas toujours sûre) et qu'elles permettaient d'obtenir un effet de refroidissement plus important. Dans l'interview, Rosander dit également que la méthode Layman est une technique où des jets d'eau sont appliqués au plafond et aux murs lors d'une attaque intérieure s'il n'est pas possible d'utiliser une méthode directe pour éteindre le foyer de l'incendie. Selon lui, la méthode Layman telle qu'elle était appliquée en Suède consistait en un jet droit d'un débit de 75 litres par minute, appliqué pendant que l'équipe (qui portait encore des casques ouverts à l'époque) progressait et que la porte derrière l'équipe d'attaque était maintenue fermée. Selon lui, cette méthode était assez efficace, mais elle avait ses inconvénients, ce qui a inspiré la recherche d'autres méthodes.

Il y avait trois inconvénients. Tout d'abord, il faut trouver les surfaces chaudes. Et comme cela n'est

pas facile dans une situation de mauvaise visibilité, on gaspille beaucoup d'eau dans laquelle les pompiers devront ramper. Les pompiers peuvent encore être victimes d'un embrasement ou être brûlés par la vapeur. Selon M. Rosander, cette méthode n'est satisfaisante que si les pompiers peuvent rester à l'extérieur du local en feu.

Cependant, les inconvénients identifiés pourraient également être liés à d'autres éléments de la technique, tels que le maintien de la porte fermée pendant l'extinction et le débit limité.

La suggestion de Rosander selon laquelle la méthode Layman est une technique dans laquelle un jet droit est appliqué au plafond ne correspond pas à ce que l'on peut trouver sur cette méthode. La confusion peut être due au fait que Layman a appelé sa technique une méthode indirecte.

Aujourd'hui, le terme "méthode indirecte" est utilisé pour désigner l'extinction d'un foyer protégé, en appliquant un jet droit au plafond, de sorte que le jet se brisera en gouttes qui tombent sur le foyer.

2.2.2 Knapp, Pillsworth et Flatley (2003)

Ces auteurs ont publié trois articles sur des expériences qu'ils ont réalisées dans un conteneur maritime en acier, sans incendie. Ils se sont penchés plus particulièrement sur le flux d'air et la quantité d'air déplacée en utilisant différentes techniques de lances. Le but de leurs recherches était notamment d'étudier les différents effets sur le flux d'air provoqués par le jet de la lance à ajustage lisse, le jet droit et le jet de brouillard. Dans la première partie de leur recherche, ils ont mesuré les flux d'air dans une pièce (sans feu) avec un sortant (sortant) au bout et la porte derrière ouverte. Ces trois techniques ont été appliquées en continu, c'est-à-dire sans impulsions. La lance a été ouverte et la position a été maintenue à différentes distances du sortant.

La conclusion est qu'il y a peu de différence dans le déplacement de l'air entre le jet droit et le jet de la lance à ajustage lisse. Dans les deux cas, il n'y avait pratiquement pas d'air. Le débit était d'autant plus important que l'on était éloigné du sortant. Le jet reconstitué a déplacé environ quatre fois plus d'air et le déplacement d'air a dépassé la capacité de mesure de l'équipement de mesure. De plus, la quantité d'air était trop importante pour être évacuée par le sortant. Il a été conclu qu'un jet de brouillard provoquerait une surpression importante dans la pièce même si un sortant de la taille d'une fenêtre était prévu. Cependant, la limite de cette recherche est qu'il n'est pas clair, quelle influence l'écoulement provenant du foyer et les effets de la formation de vapeur ont sur les différences de pression.

Une deuxième série d'expériences a été menée pour étudier l'effet du profil de ventilation sur le flux d'air, toujours sans incendie. Dans tous les cas, il y avait un flux d'air non restreint (porte ouverte et deux fenêtres ouvertes) derrière l'opérateur de la lance. Trois situations d'écoulement ont été testées : une situation sans sortant, une avec une porte à moitié ouverte et une avec une porte complètement ouverte. Les attaques ont été réalisées à l'aide d'une lance à embout lisse, d'un jet droit et d'un jet reconstitué à 30° depuis l'entrée de la porte. Lors de l'application des jets droits, aucun déplacement d'air, aucune surpression et aucun écoulement vers l'opérateur de la lance ne se sont produits, même en l'absence de sortant. Le flux d'air provoqué par le jet reconstitué de 30° était extrême dans toutes les situations de ventilation. Le circuit aéraulique était tel qu'il y avait un retour d'eau et d'air vers l'opérateur de la lance, même lorsque le sortant était complètement ouvert. Les chercheurs ont conclu que le jet reconstitué introduisait tellement d'air qu'aucun sortant ne serait assez grand pour permettre à l'air de s'échapper.

Knapp et al. expliquent la raison pour laquelle cette méthode d'attaque est néanmoins souvent couronnée de succès par le fait que les pompiers combattent souvent des incendies d'une seule pièce et sont en mesure d'appliquer rapidement de l'eau sur le feu. Ils pensent qu'il en serait autrement si les pompiers devaient entrer dans une première pièce où d'autres pièces seraient en feu. Un détail de cet article qui mérite d'être mentionné est que, selon les auteurs, il y a tellement de fumée dans un véritable incendie qu'il est pratiquement impossible pour les opérateurs de lance de voir où va l'eau, de diriger correctement leur lance ou de vérifier la direction du flux d'air et, par conséquent, la direction du flux de vapeur.

Ces expériences permettent de conclure que les risques de brûlure du personnel des services d'incendie par la vapeur provenant d'un jet droit sont moindres que si un jet reconstitué en continu est utilisé, et que la présence d'un sortant a peu d'influence sur ce point.

2.2.3 Scheffey et al. (1997)

Cet article soutient qu'une attaque directe avec un jet droit est appliquée principalement aux incendies dans leur phase naissante où le foyer peut être atteint directement. Si la chaleur, les gaz et la fumée d'un incendie qui s'est développé davantage ont atteint un niveau tel qu'il n'est plus possible d'entrer dans la pièce, la méthode indirecte est appliquée. Selon les auteurs, il existe de nombreuses situations intermédiaires où il est possible de pénétrer dans la pièce avant d'effectuer une attaque intérieure, mais où des obstacles empêchent d'atteindre directement le foyer avec le jet droit. Le temps supplémentaire nécessaire pour trouver le foyer afin d'effectuer une attaque directe constitue une menace pour la sécurité, en particulier si le feu est contrôlé par la ventilation. Dans ce cas, une attaque indirecte serait la seule option. Mais, selon les auteurs, cela créerait une grande quantité de vapeur, réduisant la visibilité et perturbant la couche thermique. La technique de la lance, c'est-à-dire l'« attaque offensive par jet brouillard », qui consiste en des impulsions de deux à trois secondes avec un jet reconstitué de 60° à un angle de 45° par rapport au plafond, permettrait de surmonter ces inconvénients.

Les pompiers doivent décider quelle technique (attaque indirecte ou directe) est la meilleure, compte tenu des circonstances. La question principale de la recherche de Scheffey et al. était de savoir s'il pouvait y avoir une technique simple qui fonctionne dans toutes les situations afin que les pompiers n'aient pas à faire ce choix. L'objectif de cette recherche était d'établir les avantages et les inconvénients d'une attaque offensive par jet brouillard par rapport au traditionnel jet droit. Ceci a été étudié au moyen d'expériences réalisées dans un navire de marine en acier. Les dessins ne sont pas très clairs, mais une pièce spéciale a été aménagée quelque part au deuxième étage sous le pont et équipée d'obstacles. Le combustible était constitué de buche en bois et d'heptane, et on laissait le feu se développer jusqu'à atteindre des conditions d'embrasement ou de quasi embrasement (400-600 °C au plafond). Les obstacles rendant impossible une attaque directe, l'équipe d'attaque a été contrainte de pénétrer dans la pièce. Dans une expérience, l'équipe d'attaque a utilisé une attaque indirecte, tandis que dans une autre expérience, elle a utilisé l'"attaque offensive par jet brouillard" pour progresser vers le foyer. Le débit lors de ces expériences n'est pas exactement connu. Il semble qu'il se situait entre 76 et 360 litres par minute.

La conclusion tirée des résultats de la recherche est que l'"attaque offensive par brouillard" (impulsions avec un angle de cône de 60° à un angle de 45° par rapport au plafond) peut être appliquée si le foyer ne peut pas être atteint directement, et que l'équipe de lutte peut entrer pour contrôler les gaz chauds au-dessus de leurs têtes. L'application d'un jet droit ou d'un jet reconstitué avec un petit angle de cône par rapport au plafond a produit une grande quantité de vapeur. L'attaque par brouillard a permis de générer beaucoup moins de vapeur. Si le foyer de l'incendie pouvait être atteint directement, il n'y avait aucune différence par rapport à l'application du jet droit traditionnel. Aucun inconvénient n'a été constaté pour l'"attaque par jet brouillard".

2.2.4 Underwriters Laboratories (Zevotek et al., 2017)

Les Underwriters Laboratories ont mené des expériences sur la lutte contre les incendies à l'intérieur des bâtiments. À cette fin, ils ont construit une copie d'une maison américaine typique en bois, avec plâtre et isolation (ossature en bois). Le foyer se trouvait toujours dans une pièce à l'extrémité d'un long couloir. On s'approchait du feu par la porte d'entrée qui restait ouverte tout en progressant dans le long couloir. On laissait d'abord le feu se développer jusqu'à ce qu'il soit contrôlé par la ventilation.

Les expériences ont été réalisées comme des feux de chambre avec quelques variantes : sans ouverture de sortie, avec un sortant et avec deux ouvertures de sortie. En l'absence d'ouverture de sortie, la température de départ était plus basse et aucun embrasement ne s'est produit avant le début de l'attaque. Trois techniques ont été appliquées.

- > Un jet droit combiné à la méthode "flow and move". Cette méthode consistait à ouvrir la lance et à la diriger vers les murs et le plafond, puis à progresser dans le long couloir jusqu'au foyer.
- > La méthode "shutdown and move", au cours de laquelle la lance a été fermée puis ouverte pendant 5-10 s tout en progressant.
- > Un "brouillard étroit" (jet reconstitué avec un petit angle de cône) et l'attaque transitoire (attaque extérieure suivie d'une attaque intérieure) ont également été appliqués. Une attaque directe a été appliquée dès que le foyer a été atteint.

Pour des raisons de sécurité, les chercheurs n'ont délibérément pas utilisé la méthode du "brouillard étroit" dans le cadre d'une technique de « flow and move ». Les auteurs étaient d'avis que s'il n'y avait pas de circuit aéraulique, une pression élevée s'accumulerait au sein du foyer sans aucune possibilité d'évacuation. Selon les auteurs, des recherches supplémentaires étaient nécessaires, mais des expériences antérieures (Zevotek et al. ne fournissent pas de références) avaient montré que cela pouvait être dangereux. Pour cette raison, le brouillard étroit a été appliqué uniquement avec un sortant.

Les expériences d'attaque de feu ont montré que la vitesse à laquelle le feu est affaibli est assez similaire pour les trois méthodes (flow and move, shutdown and move, et brouillard étroit). Il importe peu qu'il y ait ou non un sortant lors de l'application des jets droits ; ce n'est pas le cas avec la méthode du brouillard étroit pour laquelle un sortant est essentielle. On a observé que la fumée s'écoulait devant l'équipe d'attaque s'il y avait un sortant. Plus l'équipe se déplaçait rapidement avec la veine d'air, mieux cela fonctionnait. Cela était également possible avec un brouillard étroit, mais comme nous l'avons mentionné, un sortant était nécessaire. Si la lance était fermée pendant le déplacement, la température augmentait à nouveau en 10-15 s. Le bâtiment contenait également un grand volume où l'effet des techniques d'impulsion a été examiné. Celles-ci n'ont été efficaces que pendant 10 à 15 secondes. Après cette période, la température est revenue à son niveau précédent.

2.2.4 Obach, Weckman et Strong (2011)

Cette étude expérimentale a été menée par l'université de Waterloo (Canada) en 2011 et publiée dans les actes d'un symposium international. L'objectif de cette étude était de déterminer l'influence de différentes techniques de lances sur les conditions dans la zone foyer, et l'effet sur la sécurité des pompiers. Des expériences en grandeur réelle ont été menées dans une pièce unique à partir d'un foyer en bucher bois. La pièce a été construite en tôle d'acier isolée. Le taux maximal de dégagement de chaleur (HRR) était d'environ 1,6 MW. Cinq techniques ont été appliquées : le jet droit, le crayonnage, le jet brouillard continu large et étroit et une technique de jet brouillard grand angle. Le débit était, selon la technique, d'environ 160 litres par minute. Températures, flux thermique, gaz les vitesses et les concentrations de gaz ont été surveillées à différentes hauteurs à l'intérieur de la pièce et devant l'ouverture de la porte.

Il y a une certaine confusion dans cet article concernant l'objectif de la recherche et de l'application du jet, puisqu'il s'agissait d'un incendie dans une seule pièce où le foyer pouvait être atteint directement par les jets. En fait, on pourrait considérer qu'il s'agit d'une attaque directe avec différentes techniques et non d'un refroidissement de la fumée, ce qui impliquerait qu'il n'est pas pertinent pour ce rapport. Cependant, comme il s'agit de l'une des rares études expérimentales dans ce domaine, elle est mentionnée ici. Les résultats montrent que la technique de crayonnage n'a pas permis de refroidir le compartiment aussi efficacement que les méthodes à jet droit continu, tandis qu'aucune des deux n'entraîne d'impact significatif sur l'opérateur de la lance. La suppression du brouillard étroit a entraîné une poussée de la couche de fumée chaude vers le bas et a conduit à une augmentation de la température dans la couche inférieure.

Selon les auteurs, cette étude préliminaire suggère que le jet droit continu à haute pression et le brouillard à angle large à plus basse pression fournissent le refroidissement le plus efficace. En tenant compte de l'impact sur le pompier, le jet droit continu à la pression optimale de 700 kPa et dirigé vers le haut de la paroi arrière du compartiment semble être le meilleur choix pour l'attaque initiale d'un gros incendie dans un petit compartiment. Bien qu'il s'agisse de la première étude et que les auteurs suggèrent qu'une recherche plus systématique soit nécessaire, aucun suivi de l'étude n'a été trouvé dans la littérature.

2.3 Critiques

2.3.1 Revue dans Zevotek et al. (2017)

La recherche la plus récente a été menée par Underwriters Laboratories en 2016 (Zevotek et al. 2017). Un résumé très concis de la littérature disponible est donné dans l'introduction et cela a également constitué la raison de la recherche. Cette revue a été le point de départ de la présente analyse documentaire. Les références abordées dans cette revue sont décrites en détail dans la section 2.2 du site.

2.3.2 Examen des techniques 3D de brouillard d'eau pour la lutte contre l'incendie (Liu et al., 2002)

Il s'agit d'un examen approfondi de la littérature disponible sur les techniques 3D. Une partie importante de la revue est consacrée à la description des recherches menées par l'Institut de recherche navale du Canada (Scheffey et al., 1997). La conclusion est que les techniques de brouillard 3D (technique d'impulsion avec un jet reconstitué dirigé sur la couche de fumée) ne sont pas uniquement destinées à une attaque directe, mais servent principalement à favoriser une progression sûre vers le foyer de l'incendie (en refroidissant la fumée). Elles sont complémentaires à l'attaque directe si le foyer de l'incendie ne peut être atteint directement. Cette revue exprime également les inquiétudes ressenties par les opposants à la méthode du brouillard 3D : a) son efficacité par rapport au jet droit, b) la possible perturbation de l'équilibre thermique dans la couche de fumée, c) la production de grandes quantités de vapeur qui peuvent causer des brûlures au personnel des services d'incendie, et d) la technique est difficile et nécessite beaucoup de formation. Cependant, le problème reste qu'il existe peu de preuves scientifiques.

2.4 Documents de réflexion

De nombreux documents de réflexion et d'opinion ont été trouvés, dont certains se réfèrent à d'autres recherches ou à d'autres examens, et d'autres sont basés sur les expériences ou opinions des auteurs. Un article décrit l'histoire des différentes techniques de lances (Kalož, 2013). Plusieurs articles traitent de l'impression que les gens ont des différentes techniques et de leurs avantages et inconvénients. Par exemple, la question de savoir pourquoi l'utilisation de lances à brouillard est tombée en désuétude malgré les preuves que les petites gouttelettes sont plus

efficaces dans la lutte contre les incendies (Whitley, 2011 ; Hartin 2013). Les défenseurs des lances à ajutage lisse affirment, entre autres, que ces jets droits ont une portée plus longue, que le jet se brise en gouttelettes lorsqu'il touche le plafond.

2.5 Livres sur la lutte contre les incendies

Outre les nombreux articles de réflexion et d'opinion publiés dans divers magazines et revues scientifiques ou semi-scientifiques, plusieurs auteurs ont également publié des livres qui traitent des différentes techniques de lances, et des livres dans lesquels les mêmes informations sont présentées sous une formulation différente. Les informations contenues dans ces livres sont souvent basées sur des opinions et des expériences, et incluent des références aux articles originaux ou à d'autres articles d'opinion. En général, ces livres ne décrivent pas de nouvelles connaissances que nous n'avons pas vues auparavant, mais parfois ils listent ces connaissances d'une manière très pratique.

2.5.1 Eau et autres agents extincteurs (Särqvist)

Stefan Särqvist est un instructeur et chercheur suédois qui a publié plusieurs articles sur l'utilisation de l'eau, le débit requis et d'autres agents d'extinction. Il a également écrit un livre sur l'utilisation de l'eau comme agent extincteur (Särqvist, 2002 ; Särqvist, 2001). Dans son livre, il décrit cinq façons différentes d'utiliser l'eau pour attaquer un incendie :

1. Refroidir la surface brûlante pour arrêter la pyrolyse.
2. Refroidir tout matériau qui ne brûle pas encore.
3. Refroidir les flammes pour les éteindre.
4. Refroidir la fumée dans la pièce.
5. Produire de la vapeur et ainsi inerte³ ou étouffer la pièce en permettant à l'eau de s'évaporer sur les surfaces chaudes de la pièce.

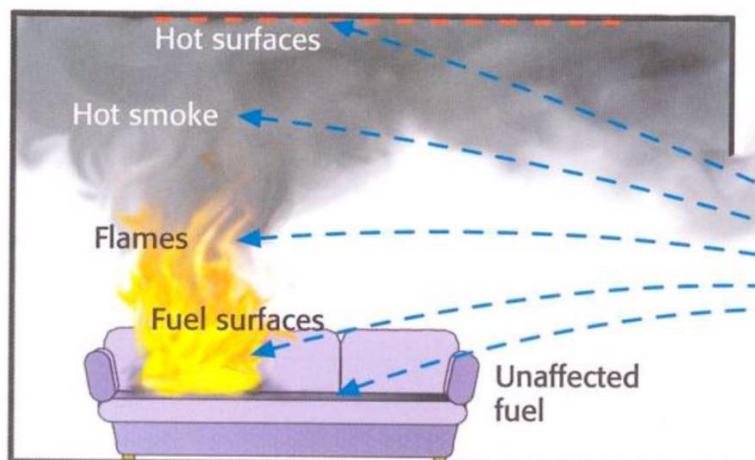


Figure 2.1 Cinq méthodes pour attaquer un incendie avec de l'eau (source : Särqvist, 2001)

³ Des recherches menées par la Fire Service Academy (Fire Service Academy, 2020) ont montré que l'inertage est plutôt improbable.

Les méthodes servent des objectifs différents ; il est utile de le savoir, compte tenu également des définitions. Il se concentre explicitement sur l'extinction de l'incendie plutôt que sur les techniques permettant de refroidir la fumée tout en progressant vers l'incendie.

2.5.2 Eurofirefighter 2 (Paul Grimwood)

Paul Grimwood est un pompier de renommée internationale qui possède une grande expérience du terrain et une formation scientifique. Il réunit deux mondes, ayant servi comme pompier à Londres, dans d'autres brigades de pompiers du Royaume-Uni, mais aussi à New York et dans d'autres brigades de pompiers des États-Unis. Il a une expérience personnelle de plusieurs méthodes d'extinction des incendies et de techniques de refroidissement des fumées. Il a également mené des recherches doctorales au cours desquelles il a étudié plusieurs centaines d'incendies et s'est penché sur la capacité de refroidissement requise (débit).

Outre la rédaction de plusieurs articles et notes (par exemple, Grimwood, 2002 ; Grimwood, 1992), il a également écrit deux livres, intitulés *Eurofirefighter* et *Eurofirefighter 2*. Dans un chapitre de ce dernier ouvrage, il s'intéresse aux techniques de lances et en particulier à la méthode américaine du jet droit et aux techniques d'impulsion du nord-ouest de l'Europe pour le refroidissement des fumées. Il décrit la discussion qu'il a eue avec Andy Fredericks, l'auteur de *Little drops of water* (Fredericks, 2000), sur l'utilisation des techniques de refroidissement des fumées à jet droit et en 3D. Le chapitre sur le comportement au feu de volumes commence par une citation de Grimwood lui-même (p. 191) :

Les pompiers suédois nous ont beaucoup appris sur le comportement du feu. Cependant, lorsqu'il s'agit de feux de bâtiments à développement rapide - et j'ai utilisé les deux options - si je devais choisir entre des jets à faible débit avec des gouttelettes d'eau finement divisées et des jets solides à haut débit, je choisirais le jet solide à chaque fois.

Cette citation suggère que Grimwood préfère un jet droit aux techniques 3D. Cependant, la citation n'apporte aucun éclairage sur les circonstances auxquelles il fait référence. S'agit-il du refroidissement de la fumée ou de l'extinction de l'incendie ? Cette question a été répondue par Grimwood dans la revue de la présente étude. Sa réponse : "Il s'agit à la fois de l'extinction et du refroidissement des fumées. Un débit adéquat à la lance est plus important que la technique d'application, lorsque les incendies augmentent soudainement leur intensité en raison du vent ou des impacts de pression ou de conditions inconnues comme un feu caché" (Grimwood, 2022).

Dans la discussion qui suit sa citation dans le livre, il corrige Fredericks qui remet en question les techniques de brouillard en 3D et, par conséquent, un article de Grimwood. Cependant, l'objection de Fredericks n'est pas vraiment claire, si ce n'est qu'il pense que les techniques doivent être aussi simples que possible pour les pompiers et que les techniques 3D ne le sont certainement pas. Et en fait, Grimwood est d'accord avec cela ; il y a plusieurs documents dans lesquels Grimwood confirme que l'application correcte des techniques 3D nécessite beaucoup de formation et d'exercices. En fin de compte, sauf sur la question de l'aspect pratique, la discussion ne répond pas explicitement à la question de savoir si une option est meilleure que l'autre. Grimwood soutient qu'un jet droit de gros volume est préférable (extinction directe), en partie en raison de la capacité de refroidissement requise pour l'extinction, mais que, lorsque l'on progresse vers le foyer d'un incendie, les techniques 3D fonctionnent bien comme moyen de refroidir la fumée et de les empêcher de s'enflammer.

Fredericks et Grimwood s'accordent sur le fait qu'un débit adéquat et la simplicité de la formation des pompiers pour réaliser l'extinction de la manière la plus sûre, la plus rapide et la plus efficace constituent l'objectif principal (Grimwood, 2022).

Lorsqu'il travaillait pour les pompiers de Londres, Grimwood a utilisé la technique de refroidissement 3D dans 549 incendies réels entre 1984 et 1994. Bien qu'il s'agisse d'une recherche pratique sur le terrain, elle est toujours pertinente. Grimwood (2017) a conclu que :

- > la technique de refroidissement semble spécifiquement bien fonctionner dans les pièces de petite à moyenne taille et dans les cages d'escalier
- > cette méthode ne doit être utilisée qu'avec des tuyaux haute pression de 19 mm produisant au moins 120 litres par minute
- > la ventilation doit être réduite pendant l'attaque
- > la pièce doit être ventilée immédiatement après avoir maîtrisé l'incendie
- > la technique de refroidissement de la fumée fonctionne mieux dans une couche stationnaire de fumée
- > cette méthode ne doit pas être appliquée à un front de flamme contre le plafond ou dans une couche de fumée se déplaçant rapidement
- > une attaque directe à l'aide d'un jet droit est préférable pour éteindre le foyer

Grimwood a conclu que les deux méthodes sont complémentaires. Dans *Eurofirefighter 2*, il ne décrit pas spécifiquement l'utilisation d'un jet droit pour le refroidissement de la fumée et les risques éventuels qu'elle comporte. Cependant, dans un courriel, il explique :

J'ai toujours approuvé l'utilisation des jets droits pour refroidir les gaz, mais j'ai mentionné que l'efficacité est réduite par rapport aux jets de fines gouttelettes. En ce qui concerne la vapeur d'eau, la vapeur d'eau est affectée par les murs et les plafonds dans les environnements d'entraînement et d'incendie réel et les différences peuvent ne pas être comprises par les pompiers et leurs instructeurs.

2.5.3 Portail du programme d'études sur la dynamique du feu (2018)

Le module 205 de FIRE (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018) décrit les méthodes d'extinction, de refroidissement des fumées et de progression vers le foyer s'il ne peut être atteint directement avec de l'eau. Le module comprend un document pour l'étudiant et une présentation qui peuvent tous deux être téléchargés sur le site web de FIRE. Il existe une différence assez fondamentale entre le texte de l'étudiant et la présentation en ce qui concerne les techniques d'extinction des incendies. La présentation décrit une méthode de "progression intérieure", la méthode de "refroidissement de surface", qui est absente du document de l'étudiant. C'est important car le terme "refroidissement de surface" est utilisé ici avec un sens différent de son sens général. En général, le terme est utilisé comme Särqvist (2002) le définit, en se référant à une méthode d'extinction, alors qu'ici il est utilisé comme une méthode pour progresser vers le foyer s'il ne peut pas être atteint directement. Ce faisant, le jet droit est dirigé vers le plafond et les gouttes d'eau tombent du plafond sur la surface en feu. Interrogé, l'auteur des ouvrages (McBride, 2021) a confirmé que le texte est en cours de révision sur la base de la norme NFPA1700 et a précisé que la technique à utiliser dépend du profil de ventilation. Selon l'auteur, il est très important de savoir s'il existe un sortant. Il estime que tous les pompiers devraient connaître toutes les techniques afin de pouvoir appliquer la bonne technique dans la situation concernée. Il n'existe pas de technique universelle qui fonctionne toujours. Plusieurs des définitions utilisées dans ce document ont été utilisées plus tard dans la norme NFPA1700 (NFPA1700, 2021) et ont été indiquées dans la section sur les définitions. Cependant, la méthode de refroidissement de surface n'est plus incluse dans la norme NFPA1700. Ce qui précède illustre la facilité avec laquelle les termes peuvent mener à des discussions et à une mauvaise communication.

2.5.4 Développement du feu (Lambert & Baaij)

Ce livre traite de plusieurs techniques de lances. Ce qui est intéressant dans ce livre, c'est qu'il relie les différentes techniques à la phase réelle de l'incendie en question. Le refroidissement de la fumée en 3D est principalement appliqué aux incendies qui ne se sont pas complètement développés (souvent, il n'y a pas de sortant et il est possible que l'incendie se soit déjà développé jusqu'au point où il passe du contrôlé par le combustible au contrôlé par la ventilation (le point FP/VP)). Un feu qui a atteint ce stade de développement peut être très chaud. Toutes les méthodes peuvent être utilisées une fois que le feu est complètement développé, c'est-à-dire également le jet droit et la méthode de l'arc.

La méthode directe, utilisant un jet droit, peut être appliquée dans le cas a) d'une attaque intérieure, b) noyage, ou c) d'une attaque intérieure pour un feu entièrement développé. Selon les auteurs, ce jet réduit toujours la visibilité et peut mettre en danger les pompiers. La grande quantité de vapeur générée entraîne une surpression qui cherche une voie d'évacuation au-delà des pompiers, à moins qu'il n'existe un autre sortant. Il n'est pas clair sur quoi cette connaissance est basée.

Suite au point c) : si le feu s'est entièrement développé et qu'une attaque transitoire (attaque extérieure offensive suivie d'une attaque intérieure offensive) n'est pas possible parce que la façade du bâtiment ne peut être atteinte, une attaque intérieure est la seule possibilité. Cependant, la température peut être si élevée que la porte d'entrée, par exemple d'un appartement, ne peut être atteinte et que les flammes peuvent sortir par la porte. Il est alors impossible d'avancer davantage afin de mener une attaque massive pour éteindre le feu. Une solution consiste à progresser jusqu'à trois mètres de la porte, puis à appliquer un jet complet sur le plafond de la pièce en feu. L'eau rebondira sur le plafond et atterrira sur le sol. Une partie de l'eau atterrira sur le combustible en feu, le refroidissant et réduisant l'intensité de l'incendie, ce qui permettra à l'équipe de lutte contre l'incendie de poursuivre sa progression.

2.6 À propos de la vapeur

Plusieurs auteurs ont écrit sur la formation de vapeur lors de l'extinction ou du refroidissement des fumées (Fredericks, 2000 ; Grimwood, 2017, Zevotek et al, 2017). L'opinion générale semble être qu'une grande quantité de vapeur est générée dans l'attaque indirecte originale où des jets brouillard sont appliqués sur des surfaces chaudes pour étouffer le feu avec beaucoup de vapeur. À l'origine, cette méthode n'était pas destinée à être utilisée à l'intérieur du volume en feu. Elle devait être appliquée depuis l'extérieur du volume en feu ou même depuis l'extérieur du bâtiment. Un élément important en ce qui concerne la formation de vapeur est de savoir si la couche de fumée se dilate ou se contracte réellement. Les avis sur ce point divergent. Certains articles font référence à la rupture du déséquilibre thermique, ce qui signifie que la couche de fumée se dilate et descend donc lorsqu'un jet droit est appliqué. Cette théorie est principalement avancée par les partisans de la méthode 3D. Grimwood (Grimwood, 2017) affirme que l'application de la technique 3D entraîne une dilatation de l'eau pendant la production de vapeur, mais que cela est compensé par le fait que la couche de fumée se contracte. Cependant, aucune preuve expérimentale ne peut être trouvée pour cela. Au contraire. Les recherches menées par Underwriters Laboratories (Fire Safety Research Institute) (Zevotek et al, 2017) ont montré que la contraction se produit même en utilisant des jets droits en appliquant l'eau sur les murs et les plafonds ; aucune vapeur excessive n'a été observée.

2.7 À propos des débits

Suite à l'étude documentaire, outre les techniques de lances à appliquer pour refroidir la fumée, les débits d'eau de lutte contre l'incendie sont importants. Une grande partie de la recherche menée par Paul Grimwood était sur l'étude des débits tactiques et optimaux pour la lutte contre les incendies. Sur la base de centaines d'incendies réels, il a calculé les débits optimaux et tactiques (Grimwood, 2020).

Il existe une base de preuves très bien établie qui soutient ces débits optimaux ou tactiques, en dessous desquels l'exposition injustifiée des pompiers aux conditions thermiques est accrue. En ce qui concerne les méthodes à embout lisse ou à "arc", le taux d'application (faible) est très important. En termes scientifiques ou pratiques, les données démontrent que la croissance du feu et le débit nécessitent une certaine capacité de refroidissement (environ 24 litres par minute par MW)⁴ (Grimwood, 2022).

2.8 Le rôle des sortants

2.8.1 Sortant et circuit aéraulique

Plusieurs documents discutent de la question de savoir si un sortant est, ou non, nécessaire. Un circuit aéraulique est le chemin emprunté par la fumée, l'air, la chaleur ou les flammes vers ou depuis une ouverture, par exemple une fenêtre, une porte ou un point de fuite, en raison des différences de pression (NFPA1700, 2020).

Lorsque Layman a appliqué le jet brouillard dans ses expériences, il y avait un sortant au sommet du bâtiment (Taylor & Whitley, 2011). Cela a probablement joué un rôle dans le résultat des expériences. Tout excès d'énergie pouvait s'échapper par la veine de gaz chaud sortant. Taylor et Whitley affirment que, si les ouvertures d'entrée et de sortie sont une seule et même ouverture, une couche de fumée chaude peut se former dans la pièce qui ne peut s'échapper que par la même ouverture. Ce qui est en fait remarquable, c'est que pas un seul article sur l'application de la méthode indirecte avec des jets brouillard ou des jets reconstitué ne fait référence à la quantité d'air qui est transportée avec les jets reconstitué, bien que les études des Underwriters Laboratories aient montré qu'elle est substantielle et qu'elle a peut-être une influence significative sur la croissance du feu et la lutte contre l'incendie, surtout s'il n'y a pas de sortant (Weinschenk et al, 2017).

Aucun effet indésirable ni aucune production de vapeur n'ont été observés lorsque les techniques de lances avec jet droit ont été appliquées sur des murs et des plafonds sans aucun sortant dans le cadre d'expériences menées par Underwriters Laboratories (Zevotek et al., 2017). Dans un échange de courriels, Zevotek a déclaré que, même en l'absence de sortant, les gaz chauds et la vapeur peuvent être déplacés au-devant de la position de l'opérateur au moyen d'un jet droit ouvert en continu. D'après son expérience, la chaleur de la vapeur ressentie lors de la progression ne se fait sentir que brièvement et la fumée chaude revient lorsque la lance est fermée. Au cours des expériences de l'UL, la porte d'accès est restée ouverte en permanence pendant que l'équipe progressait le long du couloir en appliquant le jet droit. Selon Zevotek, c'est toujours nécessaire pour permettre à la vapeur de s'écouler. Il a trouvé étrange de garder la porte fermée pendant l'extinction, surtout s'il n'y a pas d'ouverture pour la sortie des gaz chaud.

⁴ Aux Pays-Bas, nous sommes plus conservateurs et conseillons d'appliquer environ 45 litres par minute et par MW. Il y a une dépendance de l'efficacité de l'application et de l'état de développement du feu.

2.8.2 Contrôle des portes

Dans un autre rapport des Underwriters Laboratories, rédigé par Kerber, l'utilisation et la nécessité du contrôle des portes lors des attaques intérieures sont décrites (Kerber, 2013). Bien qu'une porte doit être ouverte pour pouvoir entrer, le risque de développement du feu peut être réduit en limitant la quantité d'air introduite ; la porte doit donc toujours être refermée lorsque cela est possible. Les expériences menées dans le cadre de la recherche sur la ventilation horizontale d'UL (Kerber, 2010) ont démontré que l'ouverture de la porte d'entrée doit être considérée comme une ventilation.

Dans l'entretien avec Axelsson, Rosander ne dit rien sur l'ouverture de la porte lors de l'extinction. Il mentionne cependant plusieurs aspects du troisième homme à la porte. Ce troisième homme doit inspecter la fumée, évaluer si elle peut s'enflammer, effectuer une opération de sauvetage si les choses tournent mal, alerter ses collègues de tout danger et maintenir la porte fermée (Axelsson, 2016).

3 Discussion

Ce chapitre commence par répondre aux questions de recherche, puis donne une description générale de ce que cette analyse documentaire signifie pour la pratique de la lutte contre les incendies et pour les résultats de la recherche sur le refroidissement de la fumée (Fire Service Academy, 2021).

3.1 Réponses à la question principale et aux sous-questions

La question principale de l'analyse documentaire est la suivante :

Que peut-on trouver dans la littérature internationale sur les applications des différentes techniques de lances et les risques liés aux différentes techniques, notamment pour le refroidissement de la fumée dans les petites pièces lors d'une attaque intérieure offensive ?

Les sous-questions sont :

1. Quelles sont les techniques de lances qui existent et à quoi servent-elles ?
2. Quelles études expérimentales ont été menées sur les effets de ces techniques ?
3. Quels sont les avantages et les inconvénients des techniques appliquées pour refroidir la fumée et quels risques sont identifiés dans la littérature ?

3.1.1 Quelles sont les techniques de lances qui existent et à quoi servent-elles ?

Il existe différentes techniques de lances. Les variables suivantes peuvent être identifiées :

- > la façon dont le jet sort de la lance (lance réglée en position jet droit ou jet reconstitué, ou, si des lances spéciales sont utilisées, un brouillard (gouttelettes très fines). Il existe une corrélation avec l'angle du cône.
- > son angle d'orientation.
- > le temps d'ouverture (impulsions ou jet continu).

Ces techniques sont appliquées pour éteindre l'incendie ou pour permettre une progression sûre vers le foyer. Cinq mécanismes sont identifiés pour éteindre l'incendie. Les techniques de lances utilisées à cette fin sont les méthodes directe et indirecte. La méthode directe consiste à appliquer de l'eau directement sur le foyer ou à proximité, en utilisant souvent un jet droit. La méthode indirecte utilise le mécanisme d'étouffement en générant autant de vapeur que possible dans la pièce. Cela se fait depuis l'extérieur de la pièce en dirigeant un jet brouillard dans la pièce ou en dirigeant un jet droit sur les surfaces chaudes. Lors de l'application d'un jet droit, il est également possible de faire en sorte que le jet se brise contre le plafond et les murs de sorte que les gouttelettes atterrissent sur ou près du foyer (c'est-à-dire une extinction directe) et de générer de la vapeur pour étouffer le feu et réduire la pyrolyse des matériaux des murs et du plafond.

Le refroidissement de la fumée est important pour pouvoir progresser vers le foyer. Il existe deux possibilités à cet égard, à savoir une méthode 3D où un jet reconstitué est appliqué et un jet droit. Il existe également une méthode où le jet est dirigé en forme de O, T, Z ou n, combinant le refroidissement des murs et du plafond avec la génération de vapeur et la création de gouttes d'eau.

3.1.2 Quelles études expérimentales ont été menées sur les effets de ces techniques ?

Seuls quelques cas de recherche sur le terrain concernant le refroidissement des fumées à l'aide de différentes techniques de lances ont été trouvés. Ces recherches ont été menées sur des navires (acier). De nombreuses revues ou livres basés sur des opinions et des expériences ont été publiés, mais ils ne sont pas basés sur des preuves (faits).

Ce document décrit les recherches publiées.

3.1.3 Quels sont les avantages et les inconvénients des techniques appliquées pour refroidir la fumée et quels risques sont identifiés dans la littérature ?

Il n'est pas facile de se prononcer à ce sujet sur la base de la littérature étudiée. En effet, on ne connaît aucune étude dans laquelle les différentes méthodes spécifiquement destinées au refroidissement de la fumée sont comparées. Une technique de refroidissement en 3D semble bien fonctionner pour le refroidissement de la fumée dans les petites pièces.

Toutefois, les auteurs s'accordent à dire que la technique 3D, dans laquelle les pompiers doivent délivrer des impulsions dans une pièce remplie de fumée dense en veillant à ce qu'elles ne touchent pas les murs, est une technique difficile à mettre en œuvre dans la pratique, qui nécessite beaucoup de pratique, de formation et d'expérience.

Bien que de nombreuses situations différentes soient comparées les unes aux autres dans la littérature, par exemple en comparant l'extinction directe avec un jet droit à une méthode de refroidissement de la fumée telle que la méthode 3D, aucun inconvénient n'a été trouvé en ce qui concerne l'application de jets droits lors de la progression vers un incendie. Cela concerne à la fois la méthode dans laquelle le jet droit est appliqué en arc de cercle afin que le jet se brise en gouttelettes et la méthode dans laquelle les murs et les plafonds sont refroidis. Un inconvénient souvent mentionné est la production de vapeur, mais les preuves à cet égard sont vagues et ambiguës. En tout état de cause, la méthode utilisant un jet droit semble plus facile à mettre en œuvre, et une capacité de refroidissement suffisante est immédiatement disponible pour une extinction directe.

Il a été suggéré que la "méthode Layman", c'est-à-dire l'attaque indirecte dans sa forme originale (avec un jet brouillard et un faible débit), est dangereuse si de grandes quantités de vapeur sont générées dans le volume en feu, mais ce n'était pas le but pour lequel cette technique a été développée en premier lieu.

3.1.4 La question principale

Que peut-on trouver dans la littérature internationale sur les applications des différentes techniques de lances et les risques liés aux différentes techniques, notamment pour le refroidissement des fumées dans les petites pièces lors d'une attaque intérieure offensive ?

On trouve très peu de recherches expérimentales sur l'application des différentes techniques de refroidissement des fumées dans la littérature. Étant donné que différentes techniques et circonstances sont présentées dans les discussions et dans les expériences sans qu'il y ait une structure claire, il n'est pas possible d'arriver à une conclusion définitive.

La production de vapeur semble être le plus grand risque, bien que l'on ne sache pas exactement quelle est l'ampleur réelle du problème, car aucune recherche sur le terrain n'a été menée à ce sujet. Dans un souci de clarté, notre définition de la vapeur fait la distinction entre la vapeur humide et la vapeur sèche. La vapeur sous sa forme gazeuse invisible est appelée "vapeur sèche". La "vapeur humide" est une vapeur qui affecte la visibilité, c'est-à-dire qui n'est pas transparente. La vapeur humide se compose de gaz et de gouttelettes d'eau condensées. S'il est vrai qu'une grande quantité de vapeur est générée lorsqu'une grande quantité d'eau est appliquée sur des surfaces chaudes, l'option la plus sûre sera qu'il y a un sortant ou de rester à l'écart.

Cependant, il n'est pas clair dans quelle mesure la surpression et l'écoulement sont créés par la vapeur. La mesure dans laquelle la couche de fumée se contracte ou se dilate réellement n'est pas claire non plus. Il existe cependant des preuves que la formation de vapeur dépend du débit et des circonstances (dans les conteneurs de formation en acier, le comportement diffère de la pratique). L'application de débits optimaux semble être plus importante que la technique de lance appliquée.

3.2 Vue d'ensemble

Cette analyse documentaire a été réalisée afin de rechercher des faits sur les risques éventuels de la méthode de l'arc suite aux expériences de recherche sur les techniques de refroidissement des fumées menées par l'Académie des services d'incendie (Académie des services d'incendie, 2022). Ces expériences ont montré que la méthode de l'arc est une méthode efficace et facile à mettre en œuvre pour refroidir la fumée tout en progressant vers un incendie. Cette analyse documentaire montre qu'il n'est pas possible d'arriver à une conclusion tranchée quant à la méthode de refroidissement des fumées la meilleure et la plus sûre. Le débit est peut-être un facteur plus important que la technique d'application.

Il est cependant clair que la méthode 3D est généralement considérée comme compliquée et difficile à appliquer dans la pratique et qu'il faut beaucoup de pratique et de formation pour pouvoir appliquer cette méthode. Étant donné que la visibilité tend à être faible, éviter de heurter les murs est également difficile dans la pratique, même pour les pompiers expérimentés. Il n'existe pas de littérature indiquant sans ambiguïté et de manière étayée que l'application d'un jet droit comporte un risque et, si tel est le cas, quel serait ce risque. Différentes circonstances influencent les effets positifs et négatifs des différentes techniques de lances. Comme ces circonstances ne sont pas toujours définies et décrites de la même manière dans la littérature, cela revient souvent à comparer des pommes avec des oranges.

Les facteurs qui jouent un rôle sont les suivants :

1. Jet droit ou reconstitué ; déplacement d'air
2. Impulsion, y compris la durée de l'impulsion, ou ouvert en continu
3. Dissipation ou élimination de l'énergie
4. Débit (capacité de refroidissement)
5. Méthode de progression
6. Faisabilité
7. Propriétés structurelles de la pièce ou du foyer (matériau, échauffement, tampon énergétique).

Dans l'ensemble, aucune raison distincte n'a été trouvée pour expliquer pourquoi l'application d'un jet droit dans la méthode de l'arc entraînerait un risque pour les pompiers lorsqu'elle est utilisée dans le but de refroidir la fumée et donc d'empêcher la fumée de s'enflammer pendant la progression dans une petite pièce. Si la vapeur était un problème, ce risque peut être réduit en maintenant une position accroupie et en appliquant un contrôle de porte où la porte est ouverte lors de l'ouverture de la lance, permettant à la vapeur de s'échapper. C'est ainsi que cela a été fait dans les expériences de l'UL. Bien qu'il n'y ait pas eu d'écoulement derrière le foyer de l'incendie, aucune quantité excessive de vapeur n'a été générée au niveau de l'opérateur de la lance.

Les différences entre les différentes techniques semblent se réduire de plus en plus et sont plus ou moins en phase les unes avec les autres (angle du cône et portée). Les impulsions longues avec un angle de cône de 30 degrés touchent assez facilement les murs et les plafonds et les gouttes d'eau qui se forment refroidissent ainsi directement la fumée. De la vapeur est également générée en raison du contact entre l'eau et les surfaces chaudes. Étant donné que les effets des impulsions longues et de la méthode de l'arc avec un jet droit ne sont pas comparables, si les deux méthodes ne semblent pas différer beaucoup, la question se pose de savoir pourquoi l'une d'entre elles génère une quantité dangereuse de vapeur alors que l'autre non.

Une autre observation digne d'intérêt est que la littérature ne mentionne pas explicitement la situation où l'on effectue une attaque intérieure et où l'on applique un jet droit sur les surfaces afin de refroidir la couche de fumée en faisant en sorte que le jet droit se brise en gouttes d'eau qui tombent. Cette méthode n'a pas - ou du moins pas encore - de nom. Il ne s'agit pas d'un refroidissement de surface ni d'une méthode indirecte, et puisqu'il s'agit d'une attaque intérieure, il ne s'agit pas d'une attaque transitoire (bien que cela soit effectivement prévu), mais elle est très similaire à la technique "flow and move" utilisée aux États-Unis.

Il s'agit en fait d'une combinaison de plusieurs effets d'extinction et de refroidissement sur les murs, les plafonds et la fumée. Un jet d'eau est appliqué au plafond où il se brise en gouttes d'eau. Les gouttes liquides absorbent de l'énergie par évaporation de l'eau (une transition de phase nécessite de l'énergie) et parce que les gouttes d'eau se réchauffent. L'eau est appliquée sur les surfaces de la pièce, refroidissant ainsi certaines parties de la structure du bâtiment. Cela permet aux parties froides ou plus froides de la structure du bâtiment d'absorber l'énergie de la couche de fumée, réduisant ainsi l'énergie de la couche de fumée. L'efficacité de ce mécanisme est déterminée par les matériaux utilisés. Par exemple, les briques et le béton peuvent absorber beaucoup d'énergie (épaisseur thermique) avant de dégager de la chaleur, alors qu'un simple mur en acier peut absorber peu d'énergie avant de dégager de l'énergie du côté "froid" (épaisseur thermique). La vapeur générée par le refroidissement de certaines parties de la structure du bâtiment et les gaz chauds peuvent absorber une énergie supplémentaire, car la vapeur est chauffée davantage jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de la couche de fumée. Si l'angle sous lequel les gouttes rebondissent sur les murs et les plafonds est tel qu'elles tombent sur le foyer de l'incendie et ses environs directs, elles ont un effet extincteur. La quantité d'air entraînée vers le foyer est minimisée par l'utilisation d'un jet droit qui se brise dans la pièce. Dans une pièce fermée, la vapeur peut avoir un effet étouffant.

En conclusion, il ne semble pas y avoir de bonne raison de penser que l'utilisation de la méthode de l'arc présente un risque pour les pompiers.

Bibliographie

Axelsson, L. (2016). *Interview with Mats Rosander*
<https://www.youtube.com/watch?v=JM6zjDSHDWo>.

Baldwin (1970). *The use of water in the extinction of fires by brigades*. Ministry of Technology and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization FR Note No. 803.

Brandweeracademie (2021). *Als water in rook opgaat. Een experimenteel onderzoek naar de 3D pulsmethode en de boogmethode om rookgassen te koelen*. IFV.

Brandweeracademie (2020). *Voorkomen van rookgasontbrandingen*. IFV.

Cool, T. (2005). Interior indirect and combination attacks: A misunderstanding? *Fire Engineering*, 158(2).

[Fire Dynamics Curriculum Portal](#), *From Knowledge to Practice (FKTP)*. Structural Firefighting FC205.

Fredericks, A.A. (2000). Little drops of water: 50 years later, part 1. *Fire engineering*, 153(2), 63-64.

Fredericks, A.A. (2000). Little drops of water: 50 years later, part 2. *Fire engineering*, 153(3), 113-114.

Grimwood, P. & Desmet, K. (2003). *Tactical Firefighting A comprehensive guide*. Scandinavian research CEMAC Belgium.

Grimwood, P. (1992). *Fog Attack*. DMG Business Media.

Grimwood, P. (2002). *Flashover and Nozzle Techniques*. CEMAC.

Grimwood, P. (2017). *Eurofirefighter 2*. D&M Heritage Press.

Grimwood, P. (2020). *Adequate Firefighting water*. Kent Fire and Rescue Service BSPD 7974:5-2020. Glasgow Caledonian University.

Grimwood, P. (2022). Persoonlijk contact betreffende de review van deze literatuurstudie.

Grimwood, P., & Sanderson, I. (2015). A performance based approach to defining and calculating adequate firefighting water using s.8.5 of the design guide BS PD 7974:5:2014 (fire service intervention). *Fire Safety Journal*, 78, 155-167.

Kaloz, (2013). The History of the Fog Nozzle & Indirect Fire Attack. [Firefighter Nation](#).

Kerber, S., (2010). *Impact of Horizontal Ventilation on Fire Behavior in Legacy and Contemporary Residential Construction*. Underwriters Laboratories.

Kerber, S. (2013). *Study of the effectiveness of fire service vertical ventilation and suppression tactics in single family homes*. Underwriters Laboratories.

Knapp, J., Pillsworth, T, & Flatley, C. (2003). Nozzle tests prove fireground realities, Part 2. *Fire Engineering*, 9, 71-76.

- Knapp, J., Pillsworth, T., & White, S.P. (2003). Nozzle tests prove fireground realities. *Fire Engineering*, 2, 71-80.
- Lambert, K. & Baaij, S. (2011). *Brandverloop Technisch bekeken, tactisch toegepast*. SDU-uitgevers.
- Layman, L. (1952). *Attacking and Extinguishing Interior Fires*, National Fire Protection Association.
- Liu, Z. , Kashef, A., Loughheed, G.D., Bénichou, N. (2002). Review of three dimensional water fog techniques for firefighting, *IRC-RR-124*, National Research Council Canada.
- Maait Tuomisaari (1995). *Suppression of compartment fires with a small amount of water*. VTT Finland.
- McBride (2021). Telephone communication.
- National Fire Prevention Agency (2021). *NFPA 1700 Guide for structural firefighting*.
- Obach, M. Weckman, E. and Strong, A. (2011). Effects of Different Suppression Tactics on the Firefighter and Compartment Environment. *Fire safety science – Proceedings of the tenth international symposium* (pp. 321-334). International Association for Fire Safety Science.
- Royer, K. & Nelson, F.W. (1952). *Water for firefighting - rate of flow formula. Technical report* Iowa state university bulletin nr 18.
- Särgvist, S. & Holmstedt, G. (2001). Water for manual fire suppression. *Journal of Fire Protection Engineering*, 11, 4.
- Särgvist, S. (2002). *Water and other extinguishing agents*, Swedish Rescue Services Agency.
- Scheffey, J.P., Siegmann, C.W., Toomey, T.A. (1997). *1994 Attack Team Workshop, Phase II- Full-Scale- Offensive Fog Attack tests*. Naval research Laboratory.
- Taylor, J. & Whitley, W. (2011). The plug. *Fire Rescue Magazine*, 72-79.
- Weinschenk, C., Stakes, K., & Zevotek, R. (2017). *Impact of Fire Attack Utilizing Interior and exterior Streams on Firefighter Safety and Occupant Survival: Air Entrainment*. UL Firefighter Safety Research Institute.
- Whitley, W. (2011). [Why Lloyd Layman is still relevant](#). *Firefighter Nation*.
- Willi, Stakes, Regan & Zevotek (2018). *Evaluation of ventilation-controlled Fires in L-Shaped training Props*. UL Firefighter Safety Research Institute.
- Zevotek, R., Stakes, K. & Willi, J. (2017). *Impact of Fire Attack Utilizing interior and exterior streams on firefighter safety and occupant survival: full scale experiments*. UL Firefighter Safety Research Institute.
- Zevotek, R. (2021). Échange de courriels.