

I. DES INCENDIES ET DES FUMÉES

I.1 Introduction

Ce premier chapitre est consacré aux objectifs de maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers.

Dans l'idéal, ces objectifs devraient être exprimés comme des exigences fonctionnelles et non comme des règles détaillées. Nous espérons que cela sera possible à l'avenir. Aujourd'hui cependant, la sécurité dans les tunnels est le plus souvent fondée sur des règles détaillées. Cela est en grande part dû à un manque de connaissances, et d'outils et de méthodes d'études unanimement reconnus.

Ce chapitre tente de formuler des objectifs aussi bien qualitatifs que quantitatifs de maîtrise des incendies et des fumées. Ces objectifs peuvent être utilisés pour interpréter les résultats des diverses méthodes d'études décrites au chapitre IV. Ils forment la base des recommandations faites dans les autres chapitres du rapport (chapitres IV à VIII).

Après quelques mots sur les travaux antérieurs de l'AIPCR et les directives existantes, la plus importante partie de ce chapitre (§ I.4) décrit le contexte et les principes physiques. Enfin des recommandations sont données (§ I.5).

I.2 Travaux antérieurs de l'AIPCR

Les premières recommandations en ce domaine ont été présentées dans le rapport du Comité des Tunnels routiers au XXe Congrès mondial de la Route [17].

I.3 Directives existantes

Jusqu'à présent, il n'existe pas de directives exprimées en tant qu'exigences fonctionnelles pour les tunnels routiers.

I.4 Contexte et principes physiques

Afin de comprendre et d'interpréter les objectifs des règlements en matière d'incendie, il est nécessaire de posséder des connaissances de base sur la physique des incendies, les limites supportables pour les usagers en fuite et les pompiers, aussi bien que les critères de dégâts pour la construction et l'équipement des tunnels. Afin de juger si les personnes peuvent s'échapper en toute sécurité, des données sont également nécessaires sur leur vitesse de marche et sur le délai entre le début de l'incendie et celui de l'évacuation qui est la somme des délais de détection, d'alerte, de réaction et d'évacuation du véhicule.

I. OBJECTIVES OF FIRE AND SMOKE CONTROL

I.1 Introduction

This first section is devoted to the objectives of fire and smoke control in road tunnels.

Ideally the objectives should be expressed as function-based requirements and not as detailed regulations. It is hoped that it will be possible to do so in the future. Presently, however, safety in tunnels is most generally based on detailed rules. This is mostly due to a lack of knowledge and well-recognised study methods and tools.

This section attempts to formulate qualitative as well as quantitative objectives for fire and smoke control. These objectives can be used to interpret the results of the various study methods described in section IV. They are the background for the recommendations made in the further sections of this report (sections IV to VIII).

After a few words on previous work by PIARC and existing guidelines, the largest part of this section (§ 1.4) describes the physical background and principles. Finally (§ 1.5) recommendations are given.

I.2 Previous work by PIARC

First recommendations in this area have been presented in the report of the Committee on Road Tunnels for the XXth World Road Congress [17].

I.3 Existing guidelines

Up to now there are no existing guidelines expressed only as functional requirements for road tunnels.

I.4 Physical background and principles

In order to understand and interpret the objectives of fire regulations it is necessary to have basic knowledge in physics of fire, tenable limits for escaping people and firemen as well as damage criteria for tunnel construction and equipment. To judge if people can escape safely, data are also necessary on the walking speed and the time between fire start and beginning of evacuation, which consists of time for detecting, alerting, reacting and leaving vehicle.

1.4.1 Les différents types de risques

L'incendie produit des températures élevées, des rayonnements de chaleur, de basses concentrations d'oxygène, une faible visibilité et divers gaz toxiques mortels et/ou corrosifs. Tous ces phénomènes physiques, dont certains peuvent être calculés avec une certaine précision, sont dangereux pour l'homme, les ouvrages, les équipements et les véhicules.

1.4.2 Rayonnement

Le rayonnement est créé par la température et peut être exprimé comme suit pour une couche infinie de fumée dans laquelle la température est constante :

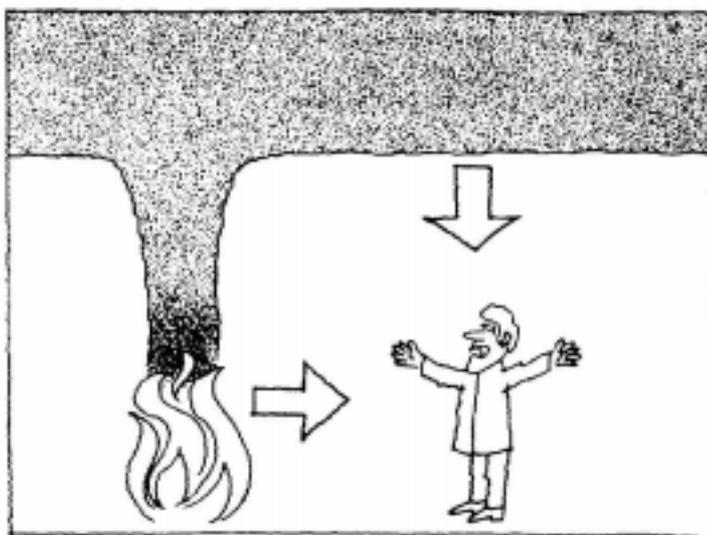
$$E_f = 5,67 \times 10^{-8} \times \varepsilon_r \times T^4 \quad W / m^2 \quad \text{éq. [1.4.2.1]}$$

où ε_r est l'émissivité résultante et T la température de la fumée (en degrés kelvins).

Le niveau du rayonnement dépend de la température et de l'émissivité de la fumée. Lorsque la température à l'intérieur de la couche de fumée n'est pas constante, une intégration est nécessaire pour calculer le niveau de rayonnement.

Le rayonnement est produit par l'incendie lui-même et par la couche de fumée chaude (figure 1.4.2.1).

La ligne continue sur la figure 1.4.2.2 montre le rayonnement touchant une personne en fuite, calculé à partir d'une couche infinie de fumée à température constante dans toute la couche. La



ligne pointillée correspond à un tunnel de 8 m de large et 6 m de haut dans lequel la fumée est descendue à 3 m au-dessus du niveau de la chaussée. Dans les deux cas, une valeur de 0,8 est prise pour ε_r . Près du foyer de l'incendie, il faut en outre prendre en compte la contribution des flammes.

Figure 1.4.2.1 - Rayonnement sur les usagers en fuite

Figure 1.4.2.1 - Radiation at escaping people

1.4.1 Different kinds of threat

Fire produces high temperatures, heat radiation, low concentration of oxygen, low visibility and different lethal toxic and/or corrosive gases. All these physical phenomena, some of which can be calculated with some accuracy, can be dangerous to people, construction, equipment and vehicles.

1.4.2 Radiation

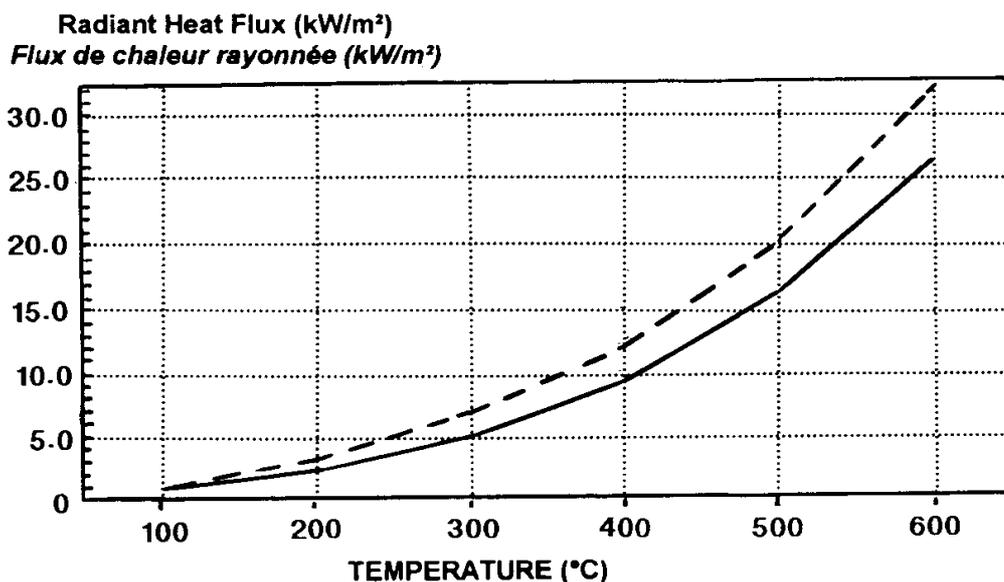
Radiation is created by temperature and may be expressed as follows for an infinite layer of smoke in which the temperature is constant:

$$E_f = 5.67 \times 10^{-8} \times \epsilon_r \times T^4 \quad W/m^2 \quad \text{eq. [1.4.2.1]}$$

where ϵ_r is the resulting emissivity and T the temperature of the smoke (in kelvins).

The level of radiation depends on the temperature and the emissivity of the smoke. When the temperature within the smoke layer is not constant an integration is necessary to calculate the radiation level.

The radiation is produced by the fire itself and by the hot smoke layer (figure 1.4.2.1).



corresponds to an infinite layer
 corresponds to a tunnel 8 m wide,
 6 m high and smoke
 at 3 m above floor

Figure 1.4.2.2 - Heat radiation at floor level

correspond à une couche infinie
 correspond à un tunnel de 8 m de large,
 6 m de haut et de la fumée
 à 3 m au-dessus du sol

Figure 1.4.2.2 - Rayonnement de chaleur
 au niveau du sol

The continuous line in figure 1.4.2.2 shows the calculated radiation affecting escaping people from an infinite smoke layer with a constant temperature in the whole layer. The dashed line corresponds to a tunnel 8 m wide and 6 m high in which the smoke layer

has descended to 3 m above road level. A value of 0.8 is assumed for ϵ_r in both cases. Near the fire site a contribution from the flames should be added.

La figure 1.4.2.3, d'après Hymes [7], montre la durée de résistance avant blessure par brûlure pour différents flux de chaleur, jusqu'à une durée d'exposition de 100 s. Par exemple, pour une durée d'exposition de 100 s, 11 kW/m² provoquent 50 % de décès.

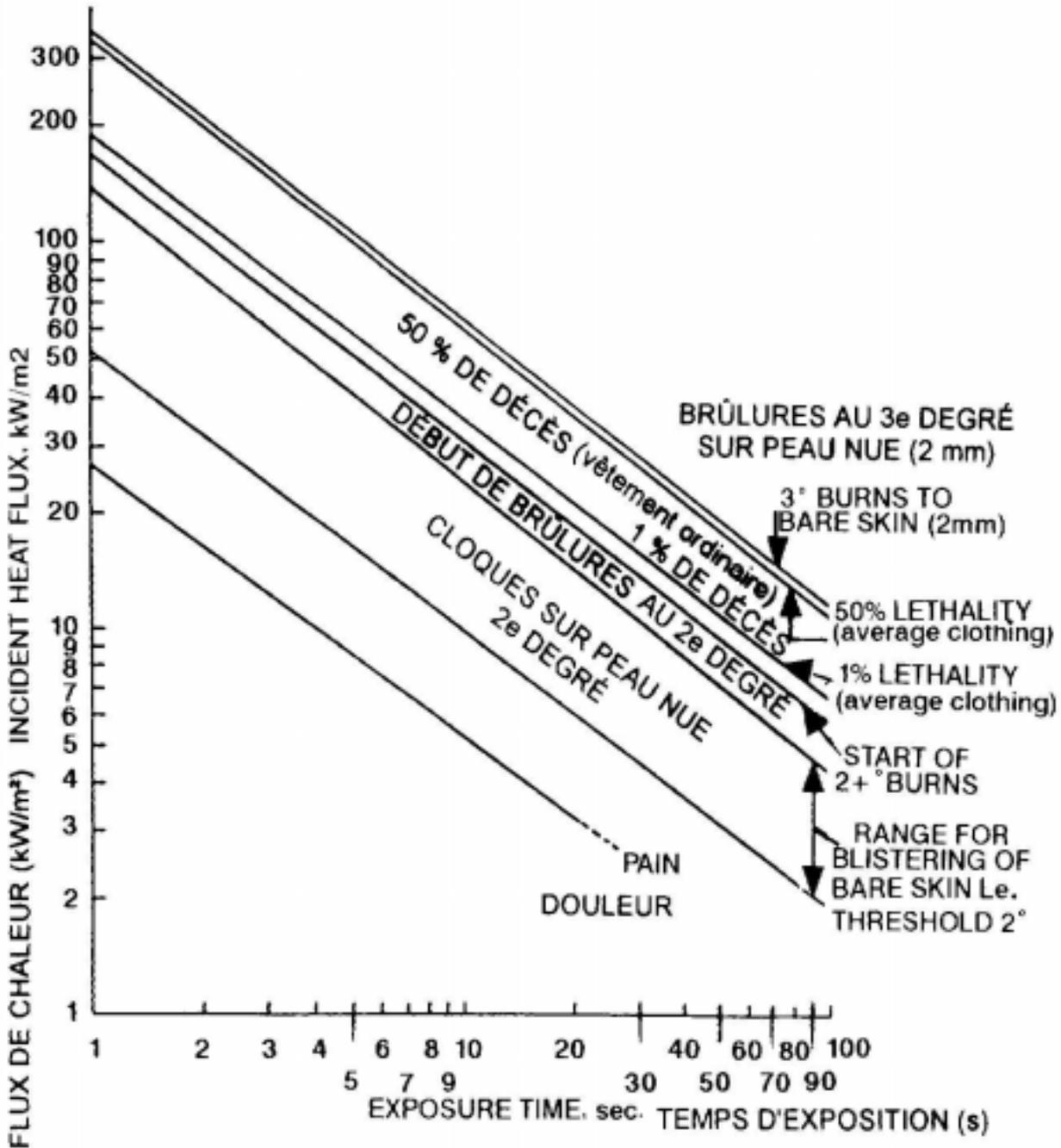


Figure 1.4.2.3 - Durée de résistance à la brûlure Figure 1.4.2.3 - Tolerance times to burn injury

Purser [13] montre, dans la figure 1.4.2.4, qu'il existe une limite d'intensité relativement évidente de 2,5 kW/m² pour la résistance à une chaleur rayonnée constante. Dans cette figure, les lettres "a" à "e" correspondent à différentes valeurs observées dans la bibliographie et les recherches.

A la figure 1.4.2.5, Danielsson [3] montre le moment où la douleur apparaît à différents niveaux de rayonnement constant. P est un facteur sécurité pour différents vêtements : P = 1 correspond à la peau nue et P = 26 correspond à des vêtements de pompier.

In figure 1.4.2.3, Hymes [7] shows tolerance times to burn injury levels for various incident heat fluxes up to an exposure time of 100 s. For example at a 100 seconds exposure time, 11 kW/m² creates 50% lethality.

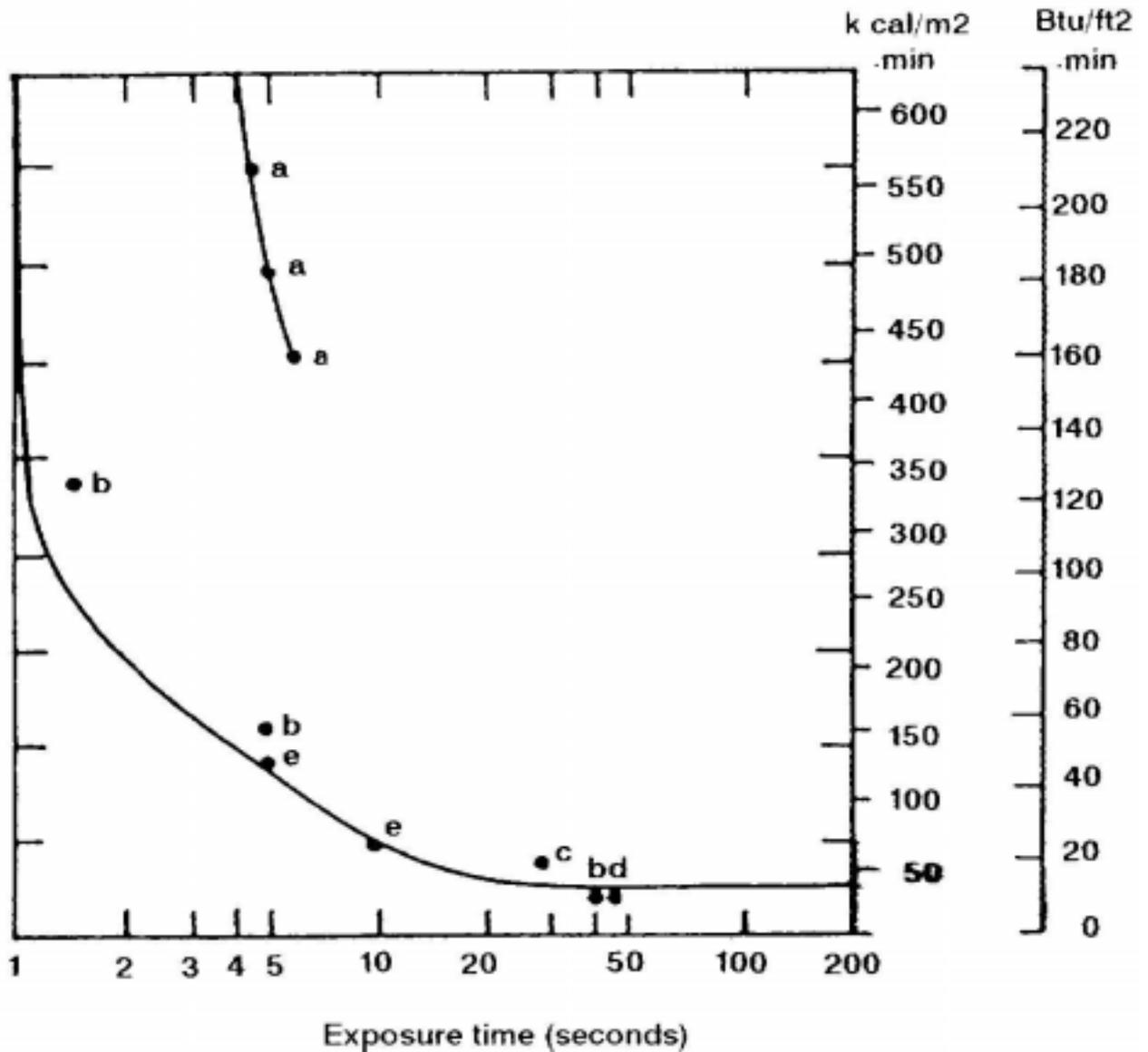


Figure 1.4.2.4 - Time to severe skin pain for exposure to radiant heat

Figure 1.4.2.4 - Résistance à la douleur après exposition à une chaleur rayonnée

Purser [13] shows in figure 1.4.2.4 that there is a fairly obvious intensity limit for tolerance of constant radiant heat at 2.5 kW/m². In this figure letters "a" to "e" correspond to different observed values in literature and investigations.

In figure 1.4.2.5 Danielsson [3] shows time until pain occurs at different constant radiation levels. P is a safety factor for different clothes: P = 1 corresponds to naked skin and P = 26 corresponds to a fire-fighter clothes.

1.4.3 Température, chaleur convectée

Résistance à la douleur / Time to pain (mn)

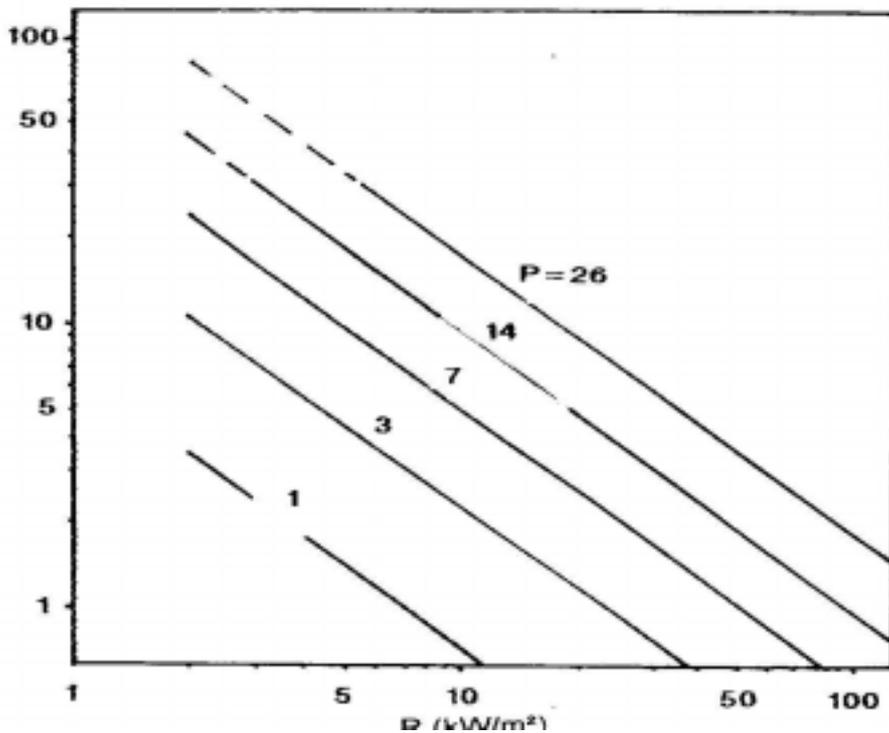


Figure 1.4.2.5 - Résistance à la douleur pour différents niveaux de radiation et différents facteurs de sécurité

Figure 1.4.2.5 - Time to pain for different radiation levels and safety factors

Purser [13] montre, dans la figure 1.4.3.1, une courbe donnant la durée de résistance à une température constante apportée par l'air convecté. Les lettres "a" à "d" correspondent à différentes valeurs relevées dans la bibliographie. La durée de résistance est définie par la douleur de l'épiderme ou l'hyper-thermie. Par exemple, il est possible de résister à une température de 80 °C pendant 15 mn en conditions humides.

L'équation 1.4.3.1 décrit les conditions d'une situation humide :

$$T_{in} (mn) = (\text{temps de mise en incapacité}) = e^{5.1849-0.0273T} \quad \text{éq [1.4.3.1]}$$

où T est la température en °C.

Si la température n'est pas constante, comme dans une situation normale, le concept de "dose" est introduit. Puisque la durée de résistance prend la forme d'une courbe exponentielle, il est possible de considérer la victime comme ayant absorbé une "dose" de chaleur convectée. Par conséquent, il est possible d'utiliser le concept d'une dose fractionnaire de chaleur absorbée chaque minute du point de vue de la mise en incapacité :

$$F_{lh} = \frac{1}{e^{5.1849-0.0273T}} \quad \text{éq. [1.4.3.2]}$$

où T est la température en °C durant cette minute. Lorsque la dose cumulée est supérieure à 1, la survie est menacée.

1.4.3 Temperature, convected heat

Purser [13] shows in figure 1.4.3.1 a curve giving the tolerance time to a constant temperature brought by convected air. Letters "a" to "d" correspond to different observed values mentioned in literature. The tolerance time is defined by skin pain or hyperthermia. For instance a temperature of 80 °C can be withstood for 15 minutes in humid conditions.

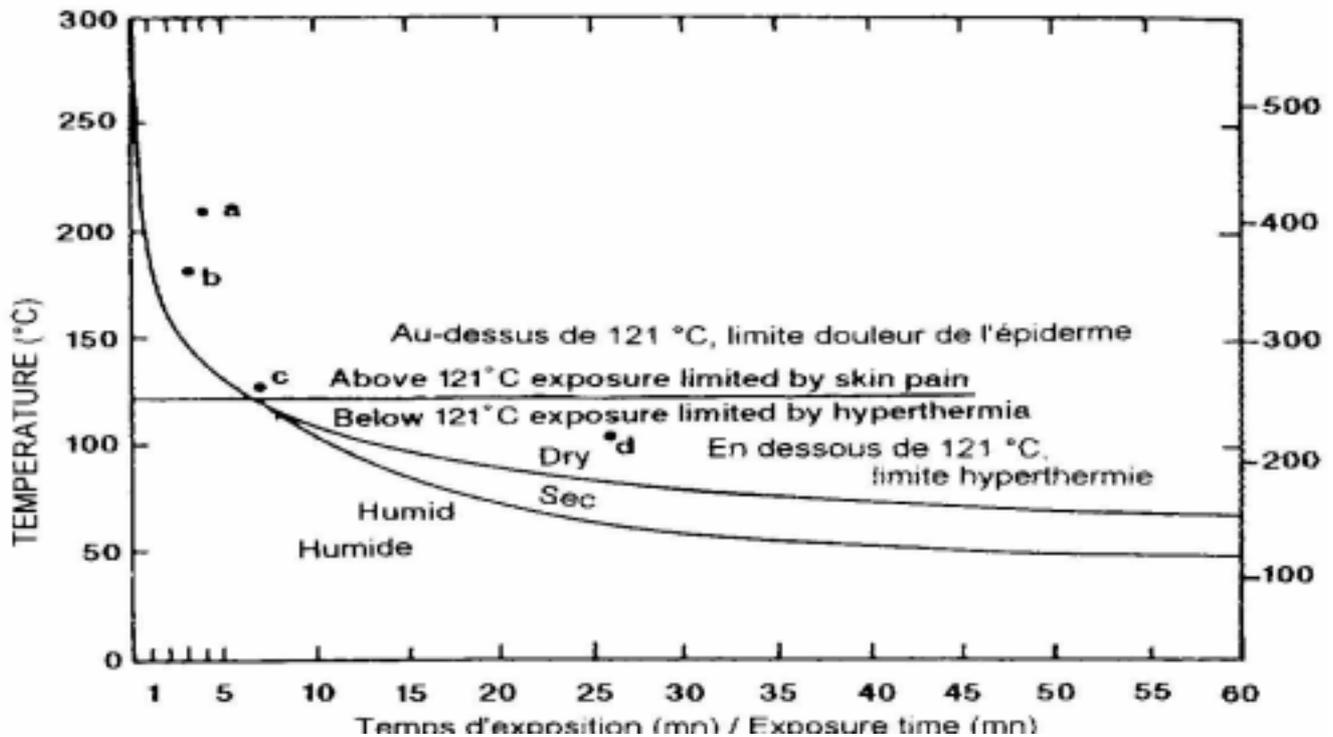


Figure 1.4.3.1 - Tolerance time to convected heat

Figure 1.4.3.1 - Durée de résistance à la chaleur convectée

Equation 1.4.3.1 describes the conditions in a humid situation:

$$T_{in} \text{ (min)} = (\text{time to incapacitation}) = e^{5.1849-0.0273T} \quad \text{eq [1.4.3.1]}$$

where T is the temperature in °C.

If the temperature is not constant, as in a normal situation, the "dose" concept is introduced. Since the tolerance time takes the form of an exponential curve, it is feasible to consider the victim as taking up a "dose" of convected heat. Thereafter it is possible to use the concept of a fractional incapacitating dose of heat acquired during each minute as follows:

$$F_{lh} = \frac{1}{e^{5.1849-0.0273T}} \quad \text{eq. [1.4.3.2]}$$

where T is the temperature in °C during that minute. When the cumulative fractional dose exceeds unity, life threatening conditions have occurred.

Un exemple est décrit au tableau 1.4.3.1. La dose cumulée est supérieure à 1 entre 2,5 et 3 mn. La mise en incapacité due à la douleur de l'épiderme et aux brûlures est ainsi prédite juste avant 3 mn, avec probablement de graves brûlures irréversibles de l'épiderme et, très probablement, de l'appareil respiratoire supérieur, particulièrement durant la quatrième minute.

Tableau 1.4.3.1 - Exemples de températures et de prévision de "dose de chaleur" conduisant à une mise en incapacité pendant un incendie donné

Durée (mn)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Température °C	38	38	44	83	173	295	461	479
F_{1h}	0	0	0,007	0,028	0,428	12,739		
Σ F_{1h}	0	0	0,007	0,035	0,463	13,202		

Ondrus [11] donne les valeurs suivantes de durée de résistance à température constante :

140 °C	5 mn
115 °C	20 mn
70 °C	60 mn
50 °C	3-5 h

Il est évident que des auteurs différents donnent des limites différentes de résistance.

1.4.4 Visibilité

Les propriétés de la fumée sont généralement exprimées en termes de facteur de transmission ainsi qu'en densité optique ou coefficient d'atténuation (également appelé coefficient d'extinction).

Le facteur de transmission T de la fumée est défini comme suit :

$$T = I_x / I_o \quad \text{éq [1.4.4.1]}$$

où I_o est l'intensité de la lumière au début du trajet and I_x l'intensité de la lumière qui subsiste après son cheminement.

La densité optique par unité de distance δ est reliée au facteur de transmission par l'équation suivante :

$$\delta = - (\log_{10} T) / x \quad \text{éq [1.4.4.2]}$$

où x est la distance parcourue par la lumière (longueur du trajet).

An example is shown in table 1.4.3.1. The cumulative fractional dose exceeds unity between 2.5 and 3 minutes. Incapacitation due to skin pain and burns is therefore predicted just before 3 minutes, with severe and probably fatal burns of the skin and upper respiratory tract being a strong possibility, particularly during the fourth minute.

Table 1.4.3.1 - Example of temperature and predicted fractional incapacitating heat dose during a specific fire

Time (mn)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Temperature °C	38	38	44	83	173	295	461	479
F _{lh}	0	0	0,007	0,028	0,428	12,739		
Σ F _{lh}	0	0	0,007	0,035	0,463	13,202		

Ondrus [11] gives the following values for tolerance time to a constant temperature:

140 °C 5 minutes
 115 °C 20 minutes
 70 °C 60 minutes
 50 °C 3-5 h

It is obvious that different authors show different tolerance limits.

1.4.4 Visibility

The properties of smoke are commonly expressed in term of transmittance as well as either optical density or attenuation coefficient (also called extinction coefficient).

The transmittance T of smoke is defined as follows:

$$T = I_x / I_o \quad \text{eq [1.4.4.1]}$$

where I_o is the intensity of light at the beginning of the path and I_x the intensity of light remaining after it has passed through the path length.

The optical density per unit distance δ is related to the transmittance by the following equation:

$$\delta = - (\log_{10} T) / x \quad \text{eq [1.4.4.2]}$$

where x is the distance travelled by light (the path length).

Le coefficient d'atténuation (ou d'extinction) par unité de distance K est défini de la même manière que la densité optique, mais utilise des logarithmes népériens :

$$K = - (\log_e T) / x \quad \text{éq [1.4.4.3]}$$

$$K = 2.303 \delta \quad \text{éq [1.4.4.4]}$$

Parfois, le pourcentage de perte de transmission λ est utilisé. Il est défini comme :

$$\lambda = 100 (1-T) \quad \text{éq [1.4.4.5]}$$

L'équation [1.4.4.2] peut alors être remplacée par :

$$\delta = \frac{\log_{10}(1 - \lambda/100)}{x} \quad \text{éq [1.4.4.6]}$$

Le tableau 1.4.4.1 compare ces différentes méthodes d'expression de la perte de visibilité par la fumée.

Tableau 1.4.4.1 - Comparaison des différentes méthodes d'expression de la perte de visibilité par la fumée

Facteur de transmission T	% de perte de transmission λ	Longueur du trajet x (m)	Densité optique δ (m^{-1})	Coefficient d'atténuation K (m^{-1})
1,00	0	quelconque	0	0
0,90	10	1	0,0458	0,1054
		10	0,0046	0,0105
0,60	40	1	0,222	0,511
		10	0,022	0,051
0,30	70	1	0,523	1,204
		10	0,052	0,120
0,10	90	1	1,00	2,30
		10	0,10	0,23
0,01	99	1	2,00	4,61
		10	0,20	0,46

La distance de visibilité D (m) peut être calculée en utilisant le coefficient d'extinction (ou d'atténuation) K (m^{-1}) du mélange air-fumée :

$$D = A / K \quad \text{éq [1.4.4.7]}$$

dans lequel A est une constante comprise entre 2 et 6 selon les panneaux qui doivent être lus (réfléchissants ou lumineux).

The attenuation (or extinction) coefficient per unit distance K is defined in the same way as the optical density, but using neperian logarithms:

$$K = -(\log_e T) / x \quad \text{eq [1.4.4.3]}$$

$$K = 2.303 \delta \quad \text{eq [1.4.4.4]}$$

Sometimes the percentage obscuration λ is used. It is defined as:

$$\lambda = 100 (1-T) \quad \text{eq [1.4.4.5]}$$

Equation [1.4.4.2] can then be replaced by

$$\delta = \frac{\log_{10}(1 - \lambda / 100)}{x} \quad \text{eq [1.4.4.6]}$$

Table 1.4.4.1 shows a comparison of these different methods of expressing smoke obscuration.

Table 1.4.4.1 - Comparison of different methods of expressing smoke obscuration

Transmittance T	Percentage obscuration λ	Path length x (m)	Optical density δ (m^{-1})	Attenuation coefficient K (m^{-1})
1.00	0	any	0	0
0.90	10	1	0.0458	0.1054
		10	0.0046	0.0105
0.60	40	1	0.222	0.511
		10	0.022	0.051
0.30	70	1	0.523	1.204
		10	0.052	0.120
0.10	90	1	1.00	2.30
		10	0.10	0.23
0.01	99	1	2.00	4.61
		10	0.20	0.46

The visibility distance D (m) can be estimated using the extinction (or attenuation) coefficient K (m^{-1}) of the air-smoke mix:

$$D = A / K \quad \text{eq [1.4.4.7]}$$

where A is a constant between 2 and 6 depending on the signs to be seen (reflecting or illuminated).

Fujimara [6] indique que $K = 0,4$ est une valeur critique du coefficient d'extinction de la fumée dans les tunnels routiers. La figure 1.4.4.1 montre la relation entre la visibilité des panneaux lumineux et le coefficient d'extinction pour de la fumée blanche irritante et non irritante.

1.4.5 Toxicité

La toxicité de la fumée d'incendie est principalement déterminée par un petit nombre de gaz qui peuvent agir de manière additionnelle, synergique ou antagoniste.

Par exemple, l'addition des effets de CO et de HCN peut être représentée par :

$$A = \frac{[\text{CO}]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{30}} + \frac{[\text{HCN}]}{\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30}} \quad \text{éq [1.4.5.1]}$$

où [] indique la concentration réelle,

$\text{LC}_{50}\text{CO}_{30} = 4\,600$ ppm (niveau de concentration auquel 50 % des personnes décéderont après 30 mn par le seul effet du CO),

$\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30} = 160$ ppm (niveau de concentration auquel 50 % des personnes décéderont après 30 mn par le seul effet du HCN).

Si $A = 1$, près de 50 % des victimes décéderont.

Si A est un peu plus grand que 1, il est probable que toutes les victimes décèdent.

Il a été démontré que cette relation était valable pour des concentrations de CO et HCN égales à 25, 50 et 75 % de leur valeur respective LC_{50} à 30 mn.

L'équation 1.4.5.1 a été appelée "l'approche par somme de fractions". Une approche plus simple considère uniquement la concentration maximale admissible pour un feu donné. Klote et Milke [9] ont présenté des niveaux globaux de mortalité pour des durées d'exposition de 5 mn et 30 mn (voir tableau 1.4.5.1). Il est clair que des auteurs différents proposent des valeurs différentes.

Fujimara [6] indicates that $K = 0.4$ is a critical value for the extinction coefficient of smoke in road tunnels. Figure 1.4.4.1 shows the relation between visibility of light emitting signs and the extinction coefficient for irritating and non irritating white smoke.

1.4.5 Toxicity

The toxicity of fire smoke is determined mainly by a small number of gases, which may act additively, synergically or antagonistically.

Figure 1.4.4.1 - Relation between visibility of light-emitting signs and smoke extinction coefficient for irritating and non irritating smoke

Figure 1.4.4.1 - Relation entre la visibilité des panneaux lumineux et le coefficient d'extinction pour de la fumée blanche irritante et non irritante

For example the addition of the influence of CO and HCN may be represented by:

$$A = \frac{[\text{CO}]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{30}} + \frac{[\text{HCN}]}{\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30}} \quad \text{eq [1.4.5.1]}$$

where [] indicates the actual concentration,

$\text{LC}_{50}\text{CO}_{30} = 4600$ ppm (concentration level at which 50% of people will die solely by CO after 30 minutes),

$\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30} = 160$ ppm (concentration level at which 50% of people will die solely by HCN after 30 minutes).

If $A = 1$, approximately 50% of the victims will die.

If A is somewhat greater than 1, all victims are expected to die.

This relation has been shown to hold for concentrations of CO and HCN equal to 25, 50 and 75% of their respective 30 minutes LC_{50} value.

Equation 1.4.5.1 has been termed the fractional summation approach. An easier approach only considers the maximum allowable concentration for a certain fire. Klote and Milke [9] have presented comprehensive lethal levels for 5 minutes and 30 minutes exposure (see table 1.4.5.1). It is evident that different authors propose different values.

Tableau 1.4.5.1 - Effets des gaz toxiques

Gaz		LC ₅₀ présumé (pour les humains)		Référence	Données de référence (espèces, mn) h=homme, r=rat, m=souris, p=primate, gpg=cochon d'inde, ham=hamster, rbt=lapin
		5 mn (ppm)	30 mn (ppm)		
CO ₂	dioxyde de carbone	> 150 000	> 150 000	Levin et al. (1987b)	r
C ₂ H ₄ O	acétaldéhyde		> 20 000	Sax (1984) ACGIH (1980)	LC(m,240)=1500 LC(r,240)=4000; LC(ham,250)=17,000 LC(r,30)=20,000; LC(r,420)=16,000
C ₂ H ₄ O ₂	acide acétique		11 000	Levin et al. (1987b)	LC(m,60)=5620
NH ₃	ammoniac	20 000	9 000	Sakurai (1988) Nishimaru (1985)	EC(m,5)=20,000; EC(m,30)=4400 EC(r,5)=10,000; EC(r,30)=4000
HCl	gaz chlorhydrique	16 000	3 700	Hartzell et al. (1985) Higgins et al. (1972)	r, p LC(r,5)=40,989
CO	monoxyde de carbone		3 000	Levin et al. (1987b) Kimmerle (1974)	LC(r,30)=4600 LC(h,30)=3000
HBr	bromure d'hydrogène		3 000	Sax (1984)	LC(m,60)=814; LC(r,60)=2858
NO	monoxyde d'azote	10 000	2 500	ACGIH (1980)	1/5 aussi toxique que NO ₂ LC(h,1)=15,000
COS	carbonyle sulfide		2 000	Sax (1984)	LC ₀ (var.,35-90)=1000-1400
H ₂ S	hydrogène sulfuré		2 000	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(m,60)=673; LC ₀ (h,30)=600; LC ₀ (ham),5=800 LC(h,30)=2000
HF	fluorure d'hydrogène	10 000	2 000	Sax (1984) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(gpg,15)=4327; LC(p,60)=1774; LC ₀ (h,30)=50 LC(m,60)=456; LC(r,60)=1276 LC(r,5)=18 200 LC(gpg,2)=300; LC(m,5)=6247; LC(r,5)=18 200
C ₃ H ₄ N	acrylonitrile		2 000	Sax (1984)	LC(gpg,240)=56; LC(r,240)=500
COF ₂	carbonyle fluoride		750	ACGIH (1980)	LC(r,60)=360
NO ₂	dioxyde d'azote	5 000	500	Sakurai (1988) Nishimaru (1985) Higgins (1972)	EC(m,5)=2 500; EC(m,30)=700 EC(r,5)=5 000; EC(r,30)=300 LC(m,5)=83 331; LC(r,5)=1 880
C ₃ H ₅ O	acroléine	750	300	Sax (1984) Kaplan et al. (1984)	LC(m,360)=66; LC ₀ (p,10)=153 LC(p,5)=505 à 1 025
CH ₂ O	formaldéhyde		250	Sax (1984) Kimmerle (1974) ACGIH (1980)	LC ₀ (r,240)=250 LC(r,30)=250; LC _j (r,240)=830(??) LC(chat,480)=700; LC(m,120)=700
SO ₂	dioxyde de soufre	500		Sax (1984) Kimmerle (1974)	rongeurs, LC(m,300)=6 000 LC(var.,5)=600 à 800
HCN	acide cyanhydrique	280	135	Levin et al. (1987b) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(r,5)=570; LC(r,30)=110 LC(r,5)=503; LC(m,5)=323 LC(h,30)=135; LC(h,5)=280
C ₉ H ₆ O ₂ N ₂	toluène disocyanate		≈100	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(gpg,240)=13; LC(rbt,180)=1 500 LC(r,360)=600; LC(m,240)=10 LC(m, r, rbt, gpg, 240)=9.7 à 13.9
COCl ₂	phosgène	50	90	Sax (1984) Clayton & Clayton (1982)	50 ppm (courte exposition) LC(h,30)=90
C ₄ F ₈	perfluoroisobutylène	28	6	Sax (1984)	LC(r,10)=17LC(r,5)=28

Notes : EC =concentration pour effet, LC₀ = concentration à laquelle les premiers effets mortels sont observés, LC = LC₅₀

Table 1.4.5.1 - Effects of toxic gases

Gas		Assumed LC ₅₀ (for humans)		Reference	Reference Data (species, minutes) h=man, r=rat, m=mouse, p=primate, gpg=guinea pig, ham=hamster, rbt=rabbit
		5 min (ppm)	30 min (ppm)		
CO ₂	carbon dioxide	>150,000	>150,000	Levin et al. (1987b)	r
C ₂ H ₄ O	acetaldehyde		> 20,000	Sax (1984) ACGIH (1980)	LC(m,240)=1500 LC(r,240)=4000; LC(ham,250)=17,000 LC(r,30)=20,000; LC(r,420)=16,000
C ₂ H ₄ O ₂	acetic acid		11,000	Levin et al. (1987b)	LC(m,60)=5620
NH ₃	ammonia	20,000	9,000	Sakurai (1988) Nishimaru (1985)	EC(m,5)=20,000; EC(m,30)=4400 EC(r,5)=10,000; EC(r,30)=4000
HCl	hydrogen chloride	16,000	3,700	Hartzell et al. (1985) Higgins et al. (1972)	r, p LC(r,5)=40,989
CO	carbon monoxide		3,000	Levin et al. (1987b) Kimmerle (1974)	LC(r,30)=4600 LC(h,30)=3000
HBr	hydrogen bromide		3,000	Sax (1984)	LC(m,60)=814; LC(r,60)=2858
NO	nitric oxide	10,000	2,500	ACGIH (1980)	1/5 as toxic as NO ₂ LC(h,1)=15,000
COS	carbonyl sulfide		2,000	Sax (1984)	LC ₀ (var.,35-90)=1000-1400
H ₂ S	hydrogen sulfide		2,000	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(m,60)=673; LC ₀ (h,30)=600; LC ₀ (ham),5=800 LC(h,30)=2000
HF	hydrogen fluoride	10,000	2,000	Sax (1984) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(gpg,15)=4327; LC(p,60)=1774; LC ₀ (h,30)=50 LC(m,60)=456; LC(r,60)=1276 LC(r,5)=18 200 LC(gpg,2)=300; LC(m,5)=6247; LC(r,5)=18 200
C ₃ H ₄ N	acrylonitrile		2,000	Sax (1984)	LC(gpg,240)=56; LC(r,240)=500
COF ₂	carbonyl fluoride		750	ACGIH (1980)	LC(r,60)=360
NO ₂	nitrogen dioxide	5,000	500	Sakurai (1988) Nishimaru (1985) Higgins (1972)	EC(m,5)=2 500; EC(m,30)=700 EC(r,5)=5 000; EC(r,30)=300 LC(m,5)=83 331; LC(r,5)=1 880
C ₃ H ₅ O	acrolein	750	300	Sax (1984) Kaplan et al. (1984)	LC(m,360)=66; LC ₀ (p,10)=153 LC(p,5)=505 to1 025
CH ₂ O	formaldehyde		250	Sax (1984) Kimmerle (1974) ACGIH (1980)	LC ₀ (r,240)=250 LC(r,30)=250; LC _i (r,240)=830(??) LC(cat,480)=700; LC(m,120)=700
SO ₂	sulfur dioxide	500		Sax (1984) Kimmerle (1974)	rodents poor, LC-(m,300)=6 000 LC(var.,5)=600 to 800
HCN	hydrogen cyanide	280	135	Levin et al. (1987b) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(r,5)=570; LC(r,30)=110 LC(r,5)=503; LC(m,5)=323 LC(h,30)=135; LC(h,5)=280
C ₉ H ₆ O ₂ N ₂	toluene disocyanate		≈100	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(gpg,240)=13; LC(rbt,180)=1 500 LC(r,360)=600; LC(m,240)=10 LC(m, r, rbt, gpg, 240)=9.7 to 13.9
COCl ₂	phosgene	50	90	Sax (1984) Clayton & Clayton (1982)	rec. 50 ppm short exp. LC(h,30)=90
C ₄ F ₈	perfluoroisobutylene	28	6	Sax (1984)	LC(r,10)=17LC(r,5)=28

Notes: EC is concentration for effect, LC₀ concentration at which first lethal effects are observed, and LC stands for LC₅₀

I.4.6 Durée de fuite

I.4.6.1 Vitesse de marche

Il existe de nombreuses informations sur la vitesse de marche sous conditions différentes, par exemple dans les immeubles et les stations de métro. Elles montrent que la vitesse de marche dans un environnement non enfumé varie entre 1 et 2 m/s. La figure 1.4.6.1 présente la vitesse de marche en présence de fumée irritante et non irritante.

Il n'existe pas de données sur la vitesse d'évacuation dans un tunnel routier, mais une bonne estimation pourrait être de l'ordre de 0,5 à 1,5 m/s selon, entre autres, la visibilité dans la fumée, l'éclairage et le dimensionnement des panneaux indiquant la sortie.

I.4.6.2 Délai avant le début du déplacement

Comme indiqué précédemment, il est nécessaire d'additionner les délais de détection et d'alerte et ceux de réaction et de sortie du véhicule à la durée du déplacement vers un lieu sûr, afin de savoir si les personnes peuvent évacuer en toute sécurité.

La somme des délais de détection et d'alerte dépend du type de détection de l'incendie et de la manière dont les informations relatives à l'incendie sont répercutées sur les automobilistes. Ce délai peut donc aller de 2 à 5 mn dans les tunnels surveillés, peut-être beaucoup plus dans les tunnels non surveillés.

La somme des délais de réaction et de sortie du véhicule est également difficile à estimer et est, par exemple, plus grande pour les passagers d'un autobus que pour ceux d'une automobile. La somme de ces délais peut donc varier entre 0,5 et 5 mn.

I.5 Recommandations

Les objectifs des dispositions destinées à faire face aux incendies en tunnel sont par ordre d'importance décroissante :

sauvegarder les vies humaines en permettant l'évacuation,
rendre possibles les opérations de secours et de lutte contre l'incendie,
éviter les explosions,
limiter les dommages sur le génie civil et les équipements du tunnel et sur les constructions voisines.

1.4.6 Escape time

1.4.6.1 Walking speed

There is a lot of information on walking speed during different conditions in for example buildings and underground stations. These show that the walking velocity in a smoke-free environment varies between 1.0 and 2.0 m/s. In figure 1.4.6.1 the walking speed is shown for non-irritating and irritating smoke.

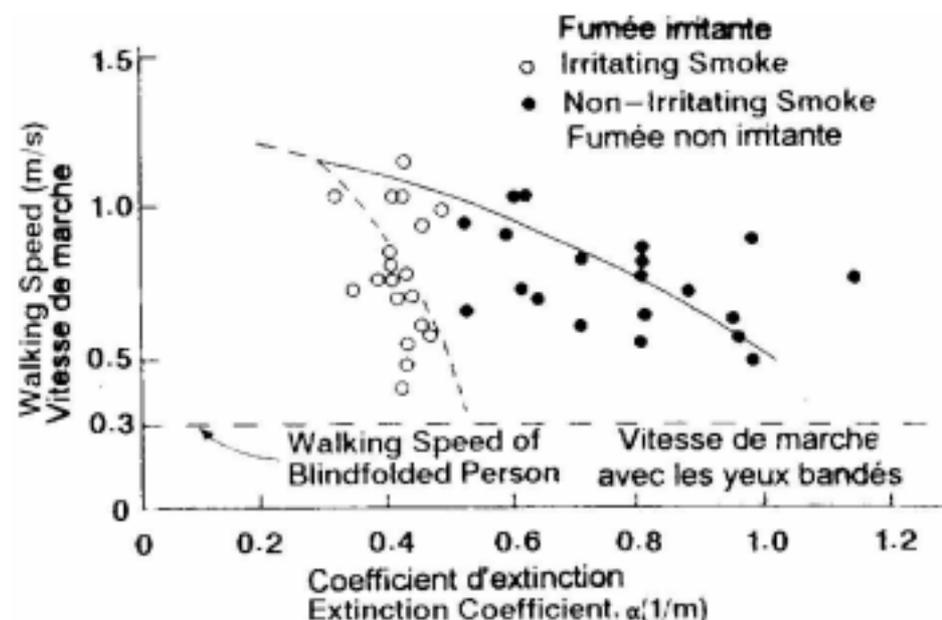


Figure 1.4.6.1 - Walking speed in irritating and non-irritating smoke

Figure 1.4.6.1 - Vitesse de marche en présence de fumée irritante et non irritante

There is no data on the evacuation speed in a road tunnel but a good guess is that it may be of the order of 0.5-1.5 m/s depending on visibility in the smoke, illumination and design of exit signs among other things.

1.4.6.2 Time before starting walking

As mentioned earlier, it is necessary to add the times for detection and alerting, and the times to react and leave the vehicle, to the walking time to a safe place, in order to know if people can escape the fire safely.

The sum of detection and alerting times depends on the type of fire detection and how the information of a fire is given to people in the cars. This time therefore can be of the order of 2-5 minutes in manned tunnels, maybe much more in non-manned tunnels.

The sum of the times to react and leave the vehicle is also difficult to estimate and is longer for example for people in a bus than in a car. The sum of these times may therefore vary between 0.5 and 5 minutes.

1.5 Recommendations

In order of importance, the aims of fire and smoke control in tunnels are:

- to save lives by making users evacuation possible,
- to make rescue and fire fighting operations possible,
- to avoid explosions,
- to limit damage to tunnel structure and equipment and to surrounding buildings.

Chacun de ces buts peut être pondéré différemment, en fonction de la politique suivie par chaque pays, du type de tunnel (immergé, urbain, etc.) et de son mode d'exploitation. Cela concerne tout particulièrement la protection du tunnel lui-même, qui peut être considérée comme plus ou moins nécessaire.

Il est possible de donner des estimations approximatives des conditions qui doivent être maintenues dans le tunnel pour les opérations d'évacuation et de lutte contre l'incendie. Le temps nécessaire pour l'évacuation peut être de plusieurs minutes, en fonction de la distance par rapport aux sorties et de la vitesse à laquelle marchent les usagers. La vitesse normale d'accès à une issue de secours est de 1,5 m/s, mais elle peut être réduite à 1 m/s, ou même moins (jusqu'à 0,5 m/s), en présence de fumée.

Rayonnement maximal

Près du foyer, le rayonnement résulte du feu lui-même et de la fumée chaude. A plus grande distance du foyer, ce n'est que la température de la fumée qui peut donner lieu à des conditions dangereuses.

Pour que l'évacuation soit possible, le niveau de rayonnement doit être inférieur à la limite provoquant une forte douleur sur la peau nue pour une exposition de quelques minutes : le seuil est approximativement de 2 à 2,5 kW/m². Les pompiers peuvent normalement supporter un niveau de rayonnement de 5 kW/m². Leur temps d'intervention ne peut pas excéder 30 minutes, avec le port d'un respirateur.

Température maximale de l'air

Pour permettre l'évacuation, la température de l'air ne doit pas excéder 80°C, cette température pouvant être tolérée pendant 15 mn.

Visibilité minimale

Une distance de visibilité d'au moins 7 m est nécessaire pour marcher aisément dans une atmosphère enfumée. Pour pouvoir lire les panneaux de signalisation, cette distance doit être de 15 m. Il faut par conséquent rechercher une distance minimale de visibilité de 7 à 15 m pour les opérations d'évacuation et de lutte contre l'incendie.

Toxicité

Aucune méthode fiable n'est connue pour calculer la concentration en gaz toxiques ou irritants dégagés par un incendie de véhicule. Des concentrations maximales ne sont donc pas données ici. Il est probable que, dans de nombreux incendies en tunnel, l'obtention d'une visibilité minimale maintiendra les concentrations en gaz dangereux en dessous du niveau admissible pour l'évacuation.

According to the policy of each country, the type of the tunnel (immersed, urban, etc.) and its mode of operation, different weights may be given to the above aims. This particularly concerns the protection of the tunnel itself, which may be considered more or less necessary.

It is possible to give rough estimates of the tunnel conditions that must be maintained for evacuation and fire-fighting operations. Evacuation time can be several minutes, depending on distance to exits and walking speed. Whilst normal walking speed to emergency exits is about 1.5 m/s, it may be reduced to about 1 m/s or even less (down to 0.5 m/s) due to the presence of smoke.

Tolerable radiation

Near the fire, the radiation is created by the fire itself as well as the hot smoke. Further away it is only the smoke temperature which creates a dangerous condition.

To make evacuation possible, the radiation level must be under the limit which causes severe pain on bare skin for an exposure of several minutes: the threshold value is roughly 2 to 2.5 kW/m². Fire-fighters can normally withstand a radiation level of 5 kW/m². Their operation time is not longer than 30 minutes wearing a breathing apparatus.

Tolerable air temperature

To make evacuation possible, the air temperature should not be higher than 80°C, which can be tolerated during 15 minutes.

Minimum visibility

A visibility distance of at least 7 m is necessary to walk smoothly in a smoky atmosphere. To read the signs this distance must be 15 m. Accordingly a minimum visibility distance of 7 to 15 m must be aimed at for evacuation and fire-fighting operations.

Toxicity

There is no reliable published method to calculate the concentration of the toxic or irritant gases released in a vehicle fire. Therefore tolerable concentrations are not given here. It is expected that in many tunnel fires, ensuring the minimum visibility will maintain the dangerous gases concentrations under the tolerable limit for evacuation.

Écaillage du béton

L'écaillage du béton ne doit pas empêcher les usagers de s'échapper, ni être à l'origine de blessures pour les pompiers. Le béton peut commencer à s'écailler à une température superficielle de 150 à 200°C. Cette limite peut être inférieure pour les tunnels sans revêtement ou revêtus d'une maçonnerie en pierre naturelle. L'écaillage n'apparaissant généralement qu'après quelques minutes, il ne pose généralement pas de problème pour les usagers en fuite. Mais il peut représenter un danger pour les pompiers.

Chute d'équipements

Les équipements lourds ne doivent pas tomber sur les personnes se trouvant à l'intérieur du tunnel. Cela signifie qu'aucun gros appareil ne doit tomber pour une température inférieure à 400-450°C pendant le temps nécessaire pour combattre l'incendie (dans un tunnel, ces températures peuvent produire un rayonnement d'environ 5 kW/m² qui correspond à la valeur maximale admissible pour les pompiers).

Résistance à la chaleur des équipements

Un nombre suffisant de ventilateurs et d'autres moyens de protection contre l'incendie doit résister à la chaleur suffisamment longtemps pour contrôler les fumées pendant la fuite des usagers et les opérations de lutte contre l'incendie.

1.6 Besoins en recherches

De nombreux domaines énoncés ci-avant nécessitent encore des recherches supplémentaires. Il est particulièrement nécessaire d'améliorer les modèles d'évacuation. Il faut également tenir compte des difficultés des personnes handicapées.

Spalling of concrete

Spalling concrete must not prevent people from escaping or injure firemen. Spalling of concrete may start at a surface temperature of 150-200°C. For tunnels with no lining or with natural stone masonry, this limit can be lower. As spalling generally begins only after a few minutes, it will generally not be a problem for escaping people. However, it may be a danger for firemen.

Fall of pieces of equipment

Heavy tunnel equipment must not fall down when people are in the tunnel. This means that no heavy item must fall under 400-450 °C during the time necessary to fight fire (in a tunnel these temperatures can produce a radiation level of about 5 kW/m², which is the maximum tolerable value for firemen).

Heat resistance of equipment

A sufficient number of fans and other fire protection measures must withstand heat long enough to control smoke during escape and fire fighting.

1.6 Needs for research

Many fields connected with the above issues still require further research. More knowledge is especially needed with regards to evacuation models. Taking into account the problems raised by disabled people should also be considered.