

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي
و البحث العلمي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département de Génie Civil

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme
MASTER en génie civil

***Protection vis-à-vis du feu des ouvrages
souterrains***

Soutenu le : 15/10/2014 par **M. HAMIDA Takieddine** devant le Jury composé de :

Président :	Mme. R. KETTAB	Professeur à l'ENP
Examineur :	M. R. BOUTMER	M.C.A à l'ENP
Examineur :	M. M. DEMIDEM	M.C.A à l'ENP
Examineur :	M. S. LEKHAL	M.C.A à l'ENP
Promotrice :	Mme. R. KETTAB	M.C.A à l'ENP

Promotion : 2014

***Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi B.P. 182 El-Harrach
16200 Alger, Algérie***

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier DIEU le tout puissant pour m'avoir donné la force et le courage de mener à terme ce travail.

Je remercie les membres de jury qui me font l'honneur de juger ce travail.

Je remercie très fort mes parents qui m'ont aidé et soutenus pendant mes études

J'adresse mes remerciements à ma promotrice M^{me} Chikh pour toutes ses suggestions et ses remarques.

Je remercie les enseignants ainsi que tout le personnel de l'Ecole Nationale Polytechnique.

ملخص

يتناول هذا العمل آثار الحريق على المنشآت تحت أرضية ووسائل الحماية

الموجودة . وناقش التصنيف التنظيمي من المواد.

.الكلمات الرئيسية: أعمال تحت الأرض، النار، النار، والأنفاق، والأمن

Résumé

Ce travail passe en revue les effets du feu sur les ouvrages souterrains et les moyens de protection existants .la classification règlementaire des matériaux est abordée.

Mots clés : ouvrages souterrains, feu , tunnels , sécurité.

abstract

This work examines the effects of fire on ground works and the existing means of protection .The regulatory classification of materials is discussed.

Keywords: underground works, fire, tunnels, security.

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
--------------------	---

CHAPITRE 1 : PHYSIQUE DE L'INCENDIE

1. Processus de déclenchement d'un incendie.....	3
2. Le feu.....	3
3. Effets du feu.....	4
3.1. Les fumées.....	4
3.2. Gaz de combustion.....	4
4. Propagation du feu.....	5
4.1 .Rayonnement.....	5
4.2 .Conduction.....	5
5. Phases d'un incendie	6
6. Développement d'un incendie – le flashover.....	7
7. Courbe iso.....	8
8. Critères réglementaires de comportement au feu.....	8
8.1.Critère de réaction au feu.....	8
8.2 .Critères de résistance au feu.....	9

CHAPITRE2 : RISQUES ACCIDENTELS EN TUNNEL

1.Introduction.....	12
2.caractéristiques des infrastructures.....	12
3. Potentiels de dangers.....	14
3.1.Risques d'incendie.....	15
3.1.1.Dispersion de fumées.....	15
3.1.2.Ventilation longitudinale.....	15
3.1.3. Ventilation transversale ou semi-transversale.....	16
3.2. Risque d'explosion.....	17
3.3.Dispersion de gaz toxiques.....	17

CHAPITRE3 :MODE DE PROTECTION VIS-A-VIS DU FEU

1.Introduction.....	19
2.Autoévacuation.....	19
2.1. Alarme et réaction de l'opérateur ou du service de permanence.....	19
2.2.Utilisation des extincteurs.....	19
3. Diagnostic.....	20
3.1. Apport du béton à l'efficacité du mur coupe-feu.....	20
3.2.Protction du béton de construction par des plaques de protection contre le feu.....	20
3.3. Continuité du fonctionnement d'installations électriques grâce aux conduits de câbles pare-feu	22
3.4. Aménagement des voies d'évacuation et de secours.....	23
3.5. Couvertures de puits pour la protection d'installations de sécurité.....	24

LISTE DES FIGURES

Fig.1. Triangle du feu.....	4
Fig.2.phases d'un incendie.....	6
Fig.3.Développement d'un incendie.....	7
Fig.4 .Courbe iso.....	8
Fig .5. Ventilation longitudinale non congestionné.....	15
Fig.6.Ventilation longitudinale en tunnel congestionné.....	16
Fig.7.Ventilation transversale en tunnel.....	17
Fig.8.Dispersion d'un nuage de gaz dense dans	18
une configuration de type tunnel	
Fig.9. Le tunnel Engelsk, site d'expérimentation dans	19
l'étude des incendies dans les tunnels.	
Fig.10. Plaques de protection contre le feu.....	21
Fig.11 .Conduits de câbles pare-feu dans les ouvrages souterraines.....	22
Fig12 : Plaques de protection contre le feu à côté de la voie ferrée.....	23
Fig.13. Couvertures de puits pour la protection	24
d'installations de sécurité	
Fig.14.Schéma descriptif de l'utilisation des plaques.....	25
de protection anti-feu	

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Poussé par la nécessité, la curiosité ou la témérité, l'homme a toujours essayé d'échapper à l'espace bidimensionnel que constitue la terre, soit en l'élargissant, ce qui n'est possible que de manière très restrictive, soit en cherchant à utiliser la troisième dimension, vers le haut ou vers le bas. Ceci n'est cependant possible que si l'homme fournit de très grands efforts, notamment pour les ouvrages souterrains, vu leur complexité

La conception et l'exécution d'un ouvrage souterrain nécessitent de la part de l'ingénieur des connaissances étendues en géologie, en hydrogéologie, et en mécanique des matériaux, ainsi que la maîtrise des différentes méthodes de construction et des aspects économiques qui s'y rattachent.

L'ingénieur doit également intégrer des exigences fonctionnelles liées à la destination de l'ouvrage (tunnels de circulation, galeries hydrauliques, usines souterraines, cavités de stockage, ...) avec des conditions naturelles souvent encore difficiles à paramétrer.

Les tunnels ont toujours permis à l'homme de traverser des obstacles ou de transporter des marchandises, ils ont toujours fait partie des infrastructures de transport

Avec l'urbanisation accrue, les tunnels deviennent plus nombreux sous les villes, pour décongestionner la circulation. Cependant, ces tunnels peuvent représenter un risque de danger réel pour le public si leur dimensionnement n'intègre pas tous les problèmes de sécurité qui peuvent se poser, et plus particulièrement les incendies

Ces dernières années, de nombreux tunnels ont été la proie du feu, provoquant de nombreux décès et un sentiment de catastrophe du fait du caractère confiné de ces ouvrages qui empêche toute fuite, et rend difficiles les interventions d'évacuation et de secours

En Algérie, à Bouira, le tunnel de Bouzegza a été le siège d'un incendie provoqué par l'inflammation d'une voiture accidentée le 12 juin 2013

Une fumée dense générée par l'incendie a bloqué des dizaines de voitures à l'intérieur du tunnel long de 1,7 kilomètre, incommodant les usagers et provoquant une grande panique

Le système de désenfumage (ventilateurs) ne fonctionnait pas. Cet accident a entraîné l'arrêt de la circulation durant plus de deux heures.

En décembre 2012 c'est la centrale téléphonique de la grande poste d'Alger, qui se trouve en sous-sol qui prend feu, privant des milliers d'abonnés de leur téléphone et d'internet.

En 2014, c'est la centrale téléphonique de Djanet !

Dans le monde, les incendies dans les tunnels ont provoqué de nombreuses pertes, humaines et matérielles, et ont abouti à la mise en place d'une réglementation stricte concernant la sécurité vis-à-vis du feu pour ces ouvrages

INTRODUCTION

Les avantages des ouvrages souterrains et des tunnels en particulier ne sont plus à démontrer : économiques, environnementaux, sociaux.

Aussi toute perturbation dans leur fonctionnement entraîne d'énormes retards et pertes. Dans le cas du tunnel sous la Manche par exemple, les impacts sociaux économiques provoqués par l'incendie dont il a fait l'objet en ont coûté deux fois plus que les réparations !

Le développement urbain augmente les risques : augmentation du trafic routier, transport de matières dangereuses, défaillances mécaniques des véhicules etc...

Le béton, matériau supposé bien résister au feu, ne garantit pas la sécurité des ouvrages souterrains

Contrairement aux autres ouvrages, les ouvrages souterrains (et les tunnels en particulier) sont plus difficiles d'accès pour les secours ou les réparations. Ils nécessitent une protection particulière et des équipements spécifiques (systèmes de désenfumage, issues de secours etc ...)

La protection vis-à-vis du feu s'impose pour trois raisons principales, qui sont la nécessité :

1. de sauver les vies humaines
2. de concevoir des structures réparables pour éviter les dommages collatéraux dus à la destruction éventuelle de l'ouvrage (inondations effondrements et affaissements etc...)
3. de maintenir le fonctionnement de l'ouvrage pour éviter les perturbations que nécessiterait la déviation du trafic, la baisse de l'activité etc...

CHAPITRE1 : PHYSIQUE DE L'INCENDIE

NOTIONS DE BASE

1. Processus de déclenchement d'un incendie

Les incendies entraînent, chaque année, dans le monde, la perte de milliers de vies humaines et des pertes matérielles considérables. La plupart des atteintes aux victimes sont dues aux fumées plutôt qu'aux flammes et à la chaleur.

La protection contre l'incendie consiste en l'application d'un certain nombre de règles et de mesures de bon sens qui ont pour but :

- d'éviter tout début d'incendie, et au cas il se déclare
- de faire en sorte que cet incendie ne se développe ni ne se propage, et qu'il soit maîtrisé avant d'avoir causé des dégâts importants ou irrémediables.

Le feu est indispensable à l'homme mais c'est également l'un de ses pires ennemis.

2. Le feu

Le feu est une réaction qui se produit si un combustible et un oxydant (ou comburant) qui est généralement l'oxygène de l'air sont mis en présence. Cette réaction, exothermique, ne peut avoir lieu que dans des conditions bien définies, et en particulier à partir d'une température qui varie d'un corps à l'autre.

La combustion, et donc le feu, ne peut se produire que lors de la réunion des trois éléments qui sont le **combustible**, le **comburant** et une **source d'énergie** (chaleur, surpression, ...).

Ce principe fondamental est souvent représenté sous la forme du « triangle du feu »

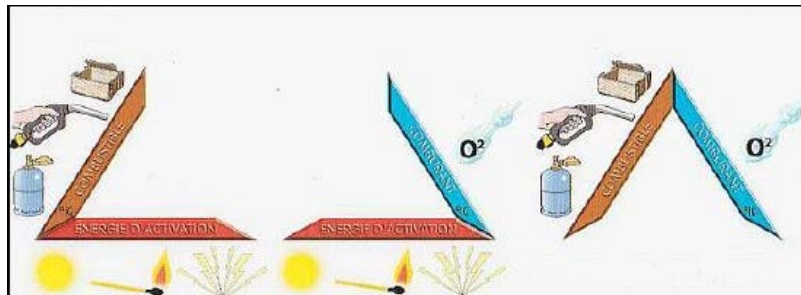


Fig.1. Triangle du feu

Pour éteindre un feu, il faudra agir sur le triangle du feu, en otant un des trois éléments le constituant.

Un feu est une combustion, contrôlée. Si cette combustion est incontrôlée, on est en présence d'un incendie

3. Effets du feu

Ce sont essentiellement les fumées et les gaz de combustion

3.1. Les fumées sont constituées de gaz de combustion et sont chargées de particules solides de produits imbrûlés. Elles présentent tous les dangers des gaz de combustion. Elles sont opaques du fait de la présence de particules solides. Les fumées comportent souvent des gaz imbrûlés, portés à température élevée. Ce mélange est souvent à l'origine de la propagation du feu.

Les fumées dégagées par l'incendie ont pour effet de gêner et même parfois d'empêcher toute intervention des secours.

3.2. Gaz de combustion

La combustion des matériaux s'effectue en dégageant des gaz qui peuvent avoir des effets toxiques et corrosifs.

Portés à température élevée, ces gaz vont contribuer à la propagation du feu. Les gaz émis lors d'un incendie dépendent de la nature des matériaux combustibles

Les principaux gaz de combustion sont :

CO : oxyde de carbone très toxique, mortel à 0,3 % dans l'air Il provoque des réactions irréversibles sur le sang. Sa formation est particulièrement importante dans les feux couvants, par manque d'oxygène.

CO₂ : dioxyde de carbone (ou gaz carbonique) n'est pas toxique, mais n'entretient pas la vie.

HCl : gaz chlorhydrique toxique produit par la combustion des PVC (polychlorures de vinyle), des matériaux ignifugés. Il est irritant et donc détecté rapidement par l'odorat. Très soluble dans l'eau, il pollue les eaux d'extinction.

HCN : gaz cyanhydrique produit par la combustion des matériaux azotés (laine, soie, polyamide, butadiène, polyuréthane, etc.). Émis à partir de 250 °C, il est très toxique et dangereux en début d'incendie. Hydrosoluble, il est entraîné par l'eau sous forme d'acide cyanhydrique dilué.

NO_x : divers gaz formés par la combustion des composés azotés :

— NO monoxyde d'azote, le plus toxique,

— NO₂ peroxyde d'azote (vapeurs rousses).

4. Propagation du feu

4.1 Rayonnement : lorsqu'un feu a pris naissance par la réunion en milieu comburant, d'un combustible et d'une source de chaleur, la combustion produit de la chaleur, des gaz et de la fumée et le feu tend à se propager ; la chaleur, souvent considérable, dégagée par le foyer, peut communiquer le feu à tout combustible qui se trouve à proximité : c'est la propagation par rayonnement.

4.2 Conduction : suffisamment chauffés par le foyer initial, des matériaux bons conducteurs de la chaleur (métaux en particulier) peuvent à leur tour échauffer suffisamment des matières combustibles, même placées à distance (exemple du tuyau de chauffage propageant le feu de l'autre côté d'un mur) : c'est la propagation par conduction.

4.3 Convection : les gaz émis lors d'une combustion sont chauds ; ils tendent à s'élever et à s'étendre surtout s'ils rencontrent un obstacle horizontal. Lorsqu'une température voisine de 600°C est atteinte, ces gaz chauds qui sont répandus, soit à des niveaux supérieurs, soit à d'autres locaux contigus, peuvent, à leur tour, s'enflammer ou enflammer des matières combustibles : c'est la propagation par convection.

La propagation du feu peut se faire aussi :

- par projection de matières combustibles enflammées après éboulement, explosion, flammèches portées par le vent, étincelles, etc. ;
- par écoulement accidentel de liquide inflammable sur le sol ou par des caniveaux, des égouts, etc.
- par rupture accidentelle de canalisations de liquides ou de gaz combustibles.

Afin d'éviter la propagation d'un incendie non maîtrisé à son origine, on peut utiliser différents moyens de compartimentage : et d'une manière générale, toute disposition constructive fixe ou mobile offrant des caractéristiques de résistance au feu suffisantes

5. Phases d'un incendie

Phase 1 : **feu couvant** ; après allumage par un point chaud (cigarette, allumette, court-circuit, soudure...), il y a début de combustion avec formation de fumées (OA).

Phase 2 : **combustion** ; apparition de flammes avec dégagement de gaz chauds et incomplètement brûlés (AB).

Phase 3 : **embrasement généralisé ou « flash over »** ; les gaz chauds (combustibles) et les particules imbrûlées des fumées portés à température d'auto-inflammation provoquent l'embrasement (BC).

Phase 4 : **développement de l'incendie** ; cette phase dépend de l'aliment du feu en combustible et en comburant (CD).

Phase 5 : **décroissance** ; soit du fait de l'intervention, soit du fait de la disparition du combustible.

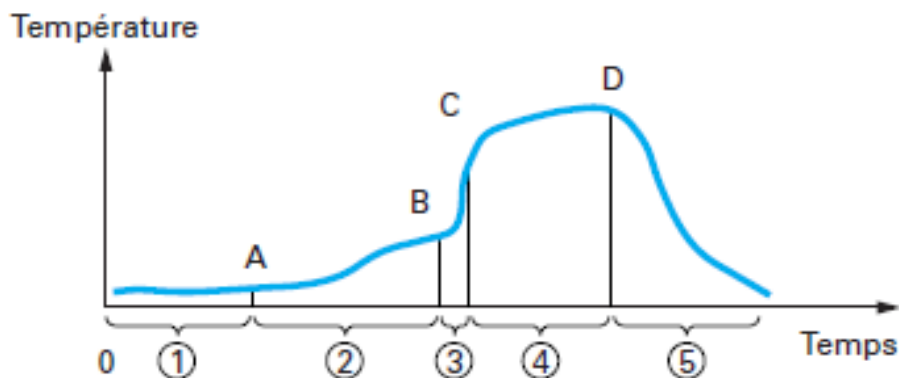


Fig.2.phases d'un incendie

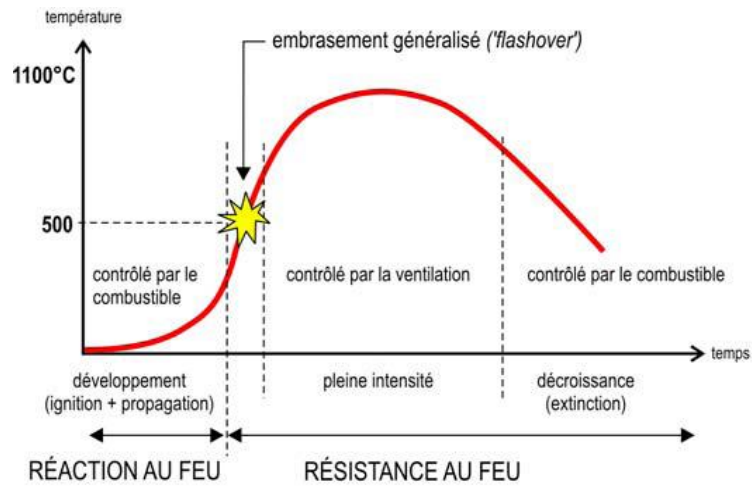


Fig.3.Développement d'un incendie

6. Développement d'un incendie – le flashover

Un incendie comporte une phase de développement où la température s'élève, puis une phase de décroissance où cette température diminue.

Une source de flamme provoque le début d'incendie d'une quantité de matériaux. Les premiers gaz et la fumée apparaissent. En milieu fermé, sous l'action de la chaleur croissante, la fumée s'élève en panache jusqu'à heurter les parois intérieures de l'ouvrage. A ce moment, elle s'étale radialement le long des parois et continue son chemin vers le bas où elle stagne dans une couche supérieure sous les parois.

En général, le local contient une couche inférieure froide se composant de l'air ambiant, de gaz et une couche supérieure chaude (modèle à deux zones).

Au cours du développement de l'incendie, il peut exister, un moment où la température du mélange gazeux de la couche supérieure est tellement élevée qu'elle provoque l'ignition de tout élément combustible dans le compartiment. Ce phénomène s'appelle le flashover ou l'embrasement généralisé. Il correspond généralement à une température de 500 à 600 °C. La montée très rapide des températures dans le compartiment et l'accroissement du dégagement de chaleur provoquent un brassage des fumées où les couches se mélangent (modèle à une zone). L'incendie est alors dit « complètement développé ».

Ces différentes phases de développement d'un incendie sont schématisées dans le graphique ci-après, montrant l'évolution de la température dans le compartiment en fonction du temps.

Le feu sera contrôlé par le combustible s'il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion. Il sera contrôlé par la ventilation s'il n'y a pas suffisamment d'oxygène. Quand le combustible est consommé à 70 %, la température des gaz baisse. Pour information, la vitesse de carbonisation du bois est de 3 à 6 cm par heure selon son essence.

7. Courbe iso

Elément de comparaison du comportement au feu de différents éléments de construction , appelée aussi courbe température/temps

$$\Delta\theta = 345 \lg (8 t + 1)$$

avec $\Delta\theta$ (°C) élévation de température,

et t (min) temps mesuré à partir du début de l'incendie.

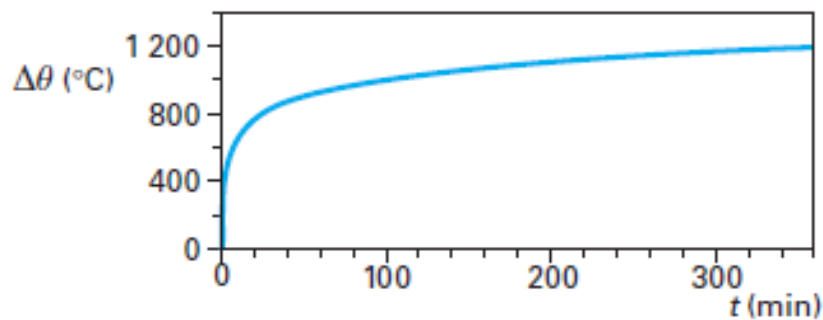


Fig.4 .Courbe Température-Temps

8. Critères réglementaires de comportement au feu

Deux critères sont retenus pour caractériser le comportement au feu de structures et classer les matériaux et éléments de construction.

- critère de réaction au feu

C'est l'aptitude d'un matériau à participer, notamment par sa propre décomposition, au feu auquel il est exposé

- critère de résistance au feu

C'est le temps pendant lequel les éléments de construction peuvent jouer le rôle qui leur est dévolu malgré l'action de l'incendie

8.1 Critère de réaction au feu :

La réaction au feu d'un matériau exprime son aptitude à s'enflammer, à contribuer au démarrage et à la propagation d'un incendie.

On détermine la réaction au feu des matériaux de construction, produits de décoration etc ... par des essais qui consistent à soumettre les produits à des sollicitations thermiques.

On évalue ainsi leur comportement au feu par rapport à des critères de performance qui portent sur leur inflammabilité.

➤ Le Classement M

En France il existe un classement, composé de 6 catégories, qui définit la réaction au feu des matériaux :

M0 " incombustibles

" M1 " non inflammables

" M2 " difficilement inflammables

" M3 " moyennement inflammables

" M4 " facilement inflammables

" M5 " très facilement inflammables"

➤ Classement Euroclasse

Classes A1, A1FL, A2 et A2FL pour les produits peu ou pas combustibles
Classe B ou BFL : pour les produits combustibles dont la contribution au "flash over" est très limitée

Classe C ou CFL pour les produits dont la contribution au flash over est limitée

Classe D ou DFL pour ceux dont la contribution au flash over est significative

Les classes E, EFL, F et FFL sont réservées aux produits combustibles dont la contribution à l'embrasement généralisé est très importante.

8.2 Critères de résistance au feu

Pour ce qui concerne la résistance au feu, la classification est établie en tenant compte du temps pendant lequel sont satisfaites les conditions imposées relativement à la résistance mécanique, à l'isolation thermique et à l'étanchéité aux flammes et aux gaz. Ainsi, en fonction du rôle dévolu à un élément de construction au cours d'un incendie, son classement peut relever d'une des trois catégories suivantes :

- Stabilité au feu (SF) : il s'agit d'un critère de résistance mécanique, stipulant que l'élément concerné continue à assurer sa fonction résistante pendant la durée requise ;
- Pare-flammes (PF) : cette catégorie implique une résistance mécanique et une étanchéité aux flammes, aux gaz chauds et inflammables ;
- Coupe-feu (CF) : l'élément de construction doit répondre non seulement aux critères de résistance mécanique, d'étanchéité aux flammes et aux gaz, mais aussi à ceux d'isolation thermique.

Il peut être noté que la stabilité au feu apparaît comme étant un critère commun aux différentes catégories susmentionnées.

Les deux derniers critères susmentionnés sont applicables pour les éléments de structure pouvant former un écran, c'est-à-dire faisant partie du compartimentage (planchers et murs), la justification des éléments unidimensionnels (poutres, poteaux, ...) n'étant conduite que vis-à-vis du critère de stabilité.

Les degrés de résistance au feu d'éléments de construction peuvent être déterminés par l'une des méthodes de classification suivantes :

- A la suite d'un ou de plusieurs essais conventionnels, associés ou non à des essais complémentaires ;
- Par analogie à des cas antérieurs ou vis-à-vis d'éléments de structures types;
- Par le calcul selon des méthodes reconnues telles que les DTR ;
- Par application d'une combinaison des trois méthodes précédentes (par exemple, une détermination expérimentale des durées de satisfaction aux critères d'isolation et d'étanchéité et un calcul pour la stabilité).

Ces méthodes déterminent le classement de résistance au feu. L'élément testé obtient un degré : SF, PF ou CF en fonction du temps pendant lequel il a satisfait aux différents

Critères (par exemple, degré SF 2h, degré CF ½ h). Ces degrés sont : ¼ h, ½ h, ¾ h, 1 h, 1h ½, 2h, 3h, 4h ou 6h.

Par ailleurs, les critères retenus par le Comité Européen de Normalisation dans le cadre de l'élaboration des Eurocodes, très proches des critères français actuels (SF, PF et CF), se définissent comme suit :

- Résistance ou stabilité mécanique (R) : critère permettant d'évaluer la capacité d'une structure ou d'un élément de structure à résister aux actions spécifiées pendant une exposition au feu donnée ;
- Etanchéité (E) : critère permettant d'évaluer la capacité d'un élément de séparation à empêcher le passage des flammes et des gaz chauds ;
- Isolation thermique (I) : critère permettant d'évaluer la capacité d'un élément séparatif à empêcher une transmission excessive de chaleur.

Remarque : La réaction au feu de certains matériaux, peut être améliorée par **ignifugation** (procédé chimique permettant de diminuer l'inflammabilité d'un matériau ou de diminuer la vitesse de propagation de la flamme à sa surface), sa **combustibilité** restant inchangée.

Autrement dit, un matériau combustible classé de M1 à M4 (ou de B à F) ne pourra pas, par ignifugation, être classé M0 (ou A1).

De plus, le traitement par ignifugation augmente la teneur en produits halogènes des gaz de combustion, surtout en chlore, ce qui en augmente la toxicité. L'ignifugation ne fait que ralentir la combustion et la propagation du feu.

CHAPITRE 2 :RISQUES ACIDENTELS EN TUNNEL

1. Introduction

Les accidents majeurs intervenus ont souligné la difficulté d'appréhender les phénomènes dangereux dans les infrastructures souterraines. L'évaluation des risques dans les transports souterrains est indispensable.

La méthode d'analyse du risque accidentel en tunnel se décompose classiquement en trois phases:

- étude des caractéristiques géométriques de l'infrastructure ;
- analyse des potentiels de dangers ;
- évaluation des risques propres à l'infrastructure

2. Caractéristiques des infrastructures

L'étude des caractéristiques de l'infrastructure permet de dresser une typologie des systèmes de transports souterrains, qui distingue deux types d'infrastructures. Ces infrastructures, tunnels routiers ou ferroviaires, ne présentent pas les mêmes risques accidentels du fait de leur configuration.

L'analyse de leur configuration tient compte de trois caractéristiques : la géométrie de l'ouvrage, le comportement des usagers qui l'empruntent et la présence ou non de marchandises dangereuses à l'intérieur de l'infrastructure.

. Le tableau suivant présente quelques exemples de spécificités des différents types d'infrastructure.

Risques accidentels en tunnel

Tableau2. Exemples de spécificités des différents types d'infrastructure

Famille d'infrastructure	Géométrie	Comportement des usagers	Transport de marchandises dangereuses
Tunnels routiers	Galerie principale avec entrées/ sorties	Circulation « libre » des véhicules et usagers	Camions et voitures partagent en même temps les infrastructures
Tunnels ferroviaires	Galerie principale avec entrées / sorties	Usagers dans les wagons, sous contrôle du personnel	Les trains de fret utilisent les mêmes tunnels que les voyageurs mais sont séparés dans le temps

Certains tunnels routiers et ferroviaires autorisent le Transport de Marchandises Dangereuses (TMD). C'est un critère important à considérer dans la mesure où il peut constituer un facteur d'aggravation du risque accidentel. Les règles d'évacuation dépendent également de la configuration de l'infrastructure, notamment dans la mesure où celle-ci induit des comportements humains différents en cas d'accident. Dans un tunnel routier par exemple, les usagers sont libres de leurs mouvements et leur comportement est difficile à contrôler alors que dans les tunnels ferroviaires, les passagers d'un train sont encadrés par le personnel lorsqu'ils quittent les wagons.

Risques accidentels en tunnel

3. Potentiels de dangers

Trois types de phénomènes dangereux ont été identifiés en matière de risque accidentel dans les systèmes de transport souterrains. Un élément important de l'étude de ces phénomènes est l'analyse de leur cinétique, qui aide à déterminer les dispositifs (ou « barrières ») de sécurité adéquats et les mesures préventives à mettre en place.

Ces phénomènes dangereux réagissent en effet différemment en termes d'amplitude et de cinétique (vitesse nécessaire au phénomène pour atteindre sa cible). Il faut donc mettre en place des stratégies de prévention et de protection pour chacun d'entre eux.

Tableau 3 : liste des phénomènes dangereux et de leurs effets

Phénomène dangereux	Types d'effets	Cinétique
Incendie	Effets thermiques Effets toxiques Perte de la visibilité	Lente : possibilité de mise en œuvre d'un système de sécurité de type ventilation
Explosion	Effet de surpression Effet thermique Projection	Rapide : Propagation rapide des ondes de pression non compatible avec la mise en œuvre d'un système de ventilation
Dispersion de gaz toxiques	Effets toxiques	Lente mais détection plus difficile que l'incendie

3.1. Risques d'incendie

3.1.1. Dispersion de fumées

L'incendie est le phénomène accidentel le plus redouté en tunnel. Les principaux effets en sont le rayonnement thermique, l'augmentation de la température mais aussi la dispersion des fumées. La présence de gaz toxiques dans les fumées peut en effet menacer la santé des usagers. Par ailleurs, la forte proportion de suies qu'elles contiennent les rend opaques, ce qui peut entraîner une baisse de la visibilité et gêner ainsi les procédures d'évacuation ou d'intervention des secours.

En cas d'incendie, un enjeu important de sécurité repose sur le phénomène de stratification des fumées. Les fumées, dont la température est très élevée, ont une densité inférieure à celle de l'air et s'accumulent en hauteur sous forme de nappes. Si une source de perturbation rend ces nappes stratifiées instables, celles-ci se « brisent », leur écoulement vers la sortie du tunnel est entravé et les fumées se dispersent dans toute l'atmosphère du tunnel, réduisant à néant les efforts de sécurité.

3.1.2. Ventilation longitudinale

Elle consiste à générer un courant d'air sur toute la longueur du tunnel au moyen d'accélérateurs disposés en partie haute de l'infrastructure. Ce principe de fonctionnement a pour effet de balayer les fumées vers la sortie du tunnel ; il est utilisé lorsque le risque de congestion de la circulation demeure faible.

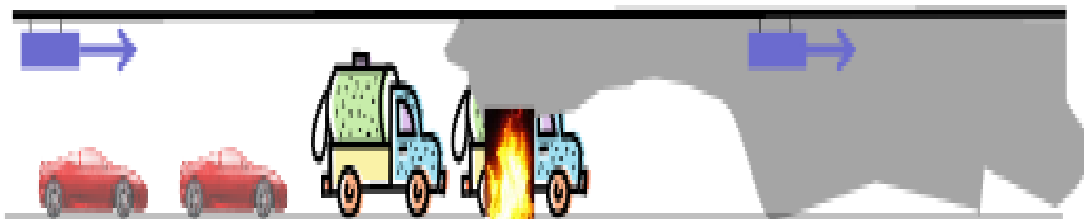


Fig7. Ventilation longitudinale non congestionnée

Risques accidentels en tunnel

La stratégie de ventilation est différente en cas de congestion du trafic. Il s'agit alors de générer un courant d'air permettant, non pas de pousser l'ensemble des fumées vers la sortie du tunnel, mais de contrôler leur répartition dans l'infrastructure et notamment d'assurer le maintien de leur stratification. Dans une telle situation, la vitesse d'air n'est pas suffisante pour empêcher la formation d'une nappe de fumée à l'amont du foyer, appelée « backlayeringSSS ».

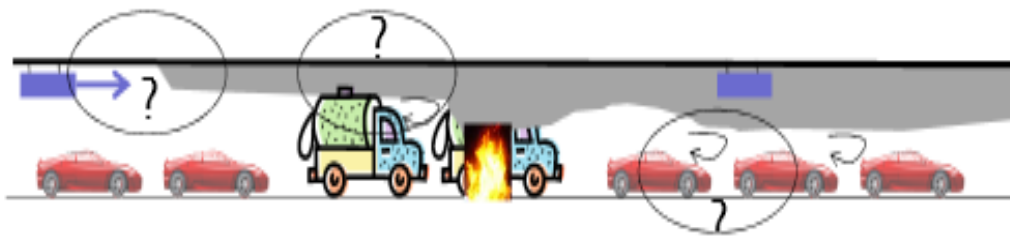


Fig.8. Ventilation longitudinale en tunnel congestionné

Deux types de perturbations doivent alors être étudiés :

- La présence des véhicules peut créer des perturbations dans l'écoulement d'air et casser ainsi la stratification des fumées ;
- Le jet des accélérateurs de la ventilation, initialement dimensionnés pour pousser les fumées hors du tunnel, peut conduire à la perte de la stratification de la nappe amont.

3.1.3. Ventilation transversale ou semi-transversale

Une ventilation transversale ou semi-transversale consiste à confiner les fumées dans des gaines d'extraction de l'air vicié situées en partie haute, par l'intermédiaire de trappes de désenfumage. Cette stratégie accroît la sécurité lorsque des usagers sont susceptibles de se trouver en aval du départ de feu. A nouveau, la stratégie de ventilation repose sur le maintien de la stratification des fumées et la question de l'impact des véhicules ou d'accélérateurs se pose. Il est nécessaire d'étudier l'impact des différentes perturbations sur la stabilité des nappes de fumée, tant pour la nappe de back layering que pour la nappe avale.

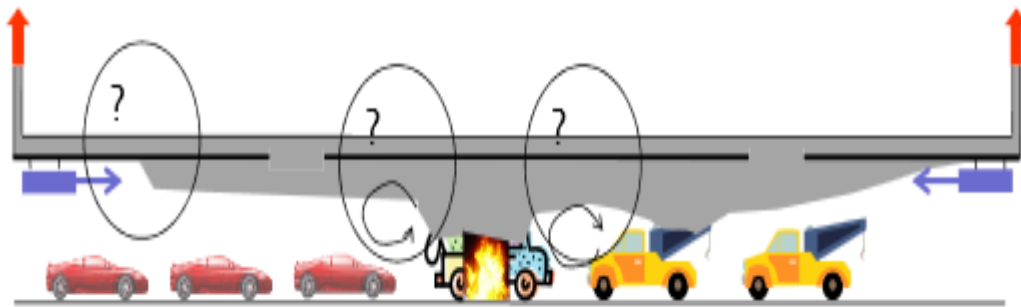


Fig9. Ventilation transversale en tunnel

3.2. Risque d'explosion

L'impact d'une explosion crée un risque maximum pour les usagers d'une infrastructure de transport souterraine : les usagers sont en danger, car ils sont susceptibles d'être affectés directement par le phénomène. Mais leur sécurité est également indirectement menacée par les dommages que les ondes peuvent causer à l'infrastructure elle-même et aux matériels (véhicules notamment) présents à l'intérieur. Ces mêmes dommages sont autant d'éléments perturbateurs qui entravent ou ralentissent les procédures d'évacuation.

Le phénomène d'explosion provoque plusieurs types d'effets : effet de surpression, effet thermique en cas de flammes et effet de projection.

3.3. Dispersion de gaz toxiques

La dispersion de gaz toxiques présente un risque en cas d'inhalation par les usagers circulant dans l'infrastructure, d'autant plus important que les concentrations de ces gaz correspondant à des doses mortelles peuvent être atteintes très rapidement. Par ailleurs, dans la mesure où chaque produit se caractérise par un seuil de toxicité différent et des propriétés chimiques spécifiques, il est difficile de prévoir les conséquences sur les usagers d'un rejet de gaz.

Risques accidentels en tunnel

Les gaz toxiques sont généralement des gaz plus lourds que l'air. De tels gaz ne se mélangent pas de façon homogène dans l'air mais peuvent former un nuage toxique stratifié en partie basse.

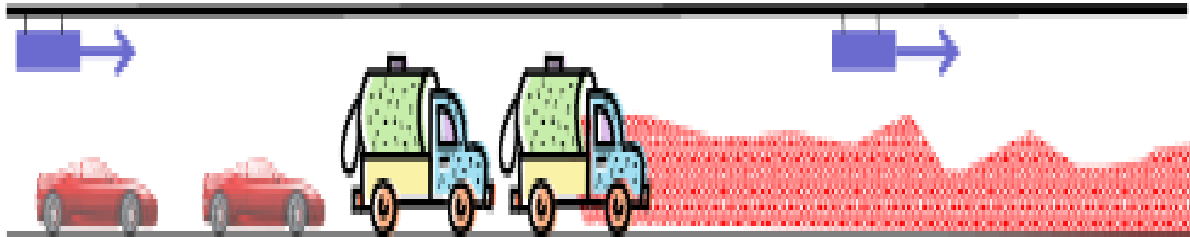


Fig.10. Dispersion d'un nuage de gaz dense dans une configuration de type tunnel

Des tunnels ont été conçus à titre expérimental. L'expérimentation ayant pour but l'observation du comportement et l'estimation des résultats d'incendies selon différents scénarios d'incendie comme le tunnel Engelsk



Fig11. Le tunnel Engelsk, site d'expérimentation dans l'étude des incendies dans les tunnels.

CHAPITRE3 :Modes de protection vis-
à-vis du feu

1.Introduction

L'événement le plus redouté en tunnel routier est l'incendie de véhicules. Tout doit être mis en œuvre pour que cet événement ne se produise pas, mais s'il se produit néanmoins tout doit être fait pour que les personnes présentes dans le tunnel puissent sortir saines et sauvées. Les premières minutes de l'incendie sont généralement cruciales de ce point de vue.

Pour mieux prendre en compte ce constat, la stratégie de protection des usagers lors d'un incendie en tunnel routier distingue la phase d'auto-évacuation (avant l'arrivée des services d'incendie et de secours) et la phase d'intervention des services d'incendie et de secours dont l'objectif prioritaire est alors de secourir les personnes encore présentes dans le tunnel.

2.Autoévacuation

L'auto-évacuation démarre dès l'instant où l'incendie n'est plus contrôlable par les usagers ou les moyens propres de l'exploitant et se termine lors de l'arrivée sur place des services d'incendie et de secours. Elle se décompose elle-même en trois temps.

2.1. Alarme et réaction de l'opérateur ou du service de permanence

Dans les tunnels non surveillés, l'alarme est en général donnée par un appel d'usager au service de permanence ou par un système de détection automatique d'incendie. Dans les tunnels surveillés, outre l'appel d'usager, le principal moyen d'alarme est la vidéo (avec l'assistance éventuelle de la détection automatique d'incident). Une autre source d'alarme est constituée par les capteurs de pollution, mais ceux-ci ne permettent pas une localisation précise de l'incendie.

2.2.Utilisation des extincteurs

Les niches de sécurité sont équipées de deux extincteurs portatifs normalisés. Ceci permet aux personnes présentes sur les lieux d'essayer d'éteindre le feu avant qu'il ne se développe. Cependant, il faut être conscient qu'éteindre un feu en développement sous

un capot de véhicule n'est pas facile pour une personne non expérimentée. Il ne faut donc pas fonder toute la stratégie de protection sur cette intervention.

3. Diagnostic

Une des règles fondamentales de la sécurité incendie consiste à préserver la vie humaine en favorisant l'évacuation des personnes. Pour permettre cela dans les meilleures conditions et préserver au maximum l'ouvrage, il faut adopter des dispositions constructives destinées à limiter la propagation du feu. Dans l'éventail des solutions les murs séparatifs coupe-feu en béton apparaissent comme une évidence, car ils constituent de véritables barrières infranchissables aux flammes et aux gaz.

3.1. Apport du béton à l'efficacité du mur coupe-feu

La nécessité des murs coupe-feu est une évidence. Leur présence permet de lutter contre la propagation et le développement de l'incendie. Du fait de ses performances, le béton est un matériau qui présente toutes les qualités pour réaliser des murs coupe-feu efficaces répondant aux exigences des réglementations en vigueur applicables aux bâtiments industriels et entrepôts. Le béton est un matériau pérenne et sûr. Sa résistance au feu est particulièrement bonne.

Pendant un incendie, la ruine brutale d'un bâtiment ou d'un tunnel peut provoquer des accidents lors de l'évacuation des personnels ou de l'intervention des sauveteurs. La présence de murs coupe-feu en béton et d'une structure en béton permet aux services de secours d'effectuer les opérations de lutte en toute sécurité sans craindre d'effondrement. De plus comme dans ce cas, l'incendie ne peut pas provoquer l'effondrement de l'ouvrage et sa ruine brutale. Les murs coupe-feu en béton comme les structures en béton sont dans la majorité des cas facilement réparables après un incendie, ce qui favorise la remise en service de l'ouvrage et la reprise de l'activité dans les meilleurs délais. Dans les ouvrages souterrains de circulation routière et ferroviaire on utilise pour construire un mur coupe-feu les plaques de verre injecté dans le béton.

3.2. Protection du béton de construction par des plaques de protection contre le feu

➤ Habillage rapporté

Lors de l'habillage rapporté, les plaques de protection contre le feu pour ouvrages souterrains destinés à la circulation sont fixées à la structure du tunnel à l'aide d'une construction en bande aux supports couvre-joints d'une épaisseur d'au moins 10 mm disposés dans le sens longitudinal et transversal ou par montage traversant. Les bandeaux supports en option empêchent le passage des flammes au niveau des joints et permettent d'obtenir une surface nettement plus régulière grâce à la rugosité. Lors de l'utilisation de vis d'ancrage pour béton auto-taraudeuses pour la fixation, ces dernières peuvent être serrées et desserrées jusqu'à 10 fois. Ainsi, les inspections et les réparations peuvent être effectuées rapidement en toute simplicité.



Fig.10. Plaques de protection contre le feu

➤ **Habillage en coffrage perdu**

Dans le cas d'un habillage en coffrage perdu, les plaques de protection contre le feu destinées aux ouvrages souterrains de circulation sont posées bout à bout dans le coffrage. Lors de l'utilisation, par exemple de béton à autoserrage, un étanchement supplémentaire des joints permet d'éviter l'infiltration de l'eau du ciment sous les plaques de protection contre le feu pour ouvrages souterrains. Les joints sont doublés par des bandeaux supports posés au dos d'une épaisseur d'au moins 10 mm et de matériau identique aux plaques. Ces bandeaux peuvent être agrafés ou vissés. Ils offrent une stabilité supplémentaire lors de la pose de l'armature et protègent les joints lors du bétonnage et en cas d'incendie. Les écarteurs pour l'armature peuvent être directement posés sur les plaques de protection contre le feu. Dans les zones d'angle et de voûtes, on peut avoir recours. La bande couvre-joint préformée est en mesure, grâce à sa compressibilité, d'absorber de petits mouvements ce qui permet une protection des arêtes de plaques. Par ailleurs, elle permet une protection efficace contre le feu dans ces secteurs.

3.3. Continuité du fonctionnement d'installations électriques grâce aux conduits de câbles pare-feu

Un feu qui se propage au câblage électrique engendre non seulement des fumées épaisses, mais dans la plupart des cas aussi des gaz extrêmement toxiques. En quelques minutes, les voies d'évacuation et de secours peuvent donc se transformer en piège mortel. De plus, le travail des équipes de sauvetage est rendu plus difficile, voire même impossible

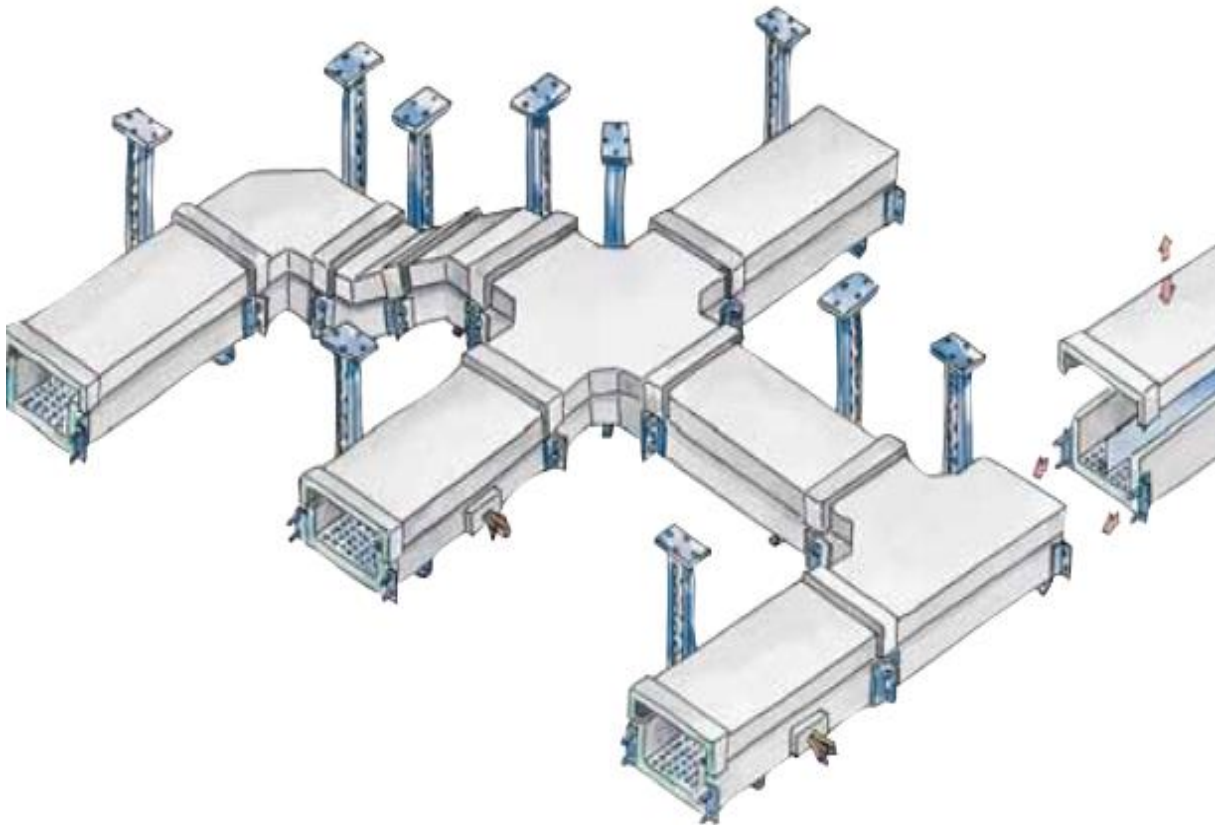


Fig.11 .Conduits de câbles pare-feu dans les ouvrages souterraines

Grâce aux conduits de câbles pare feu , les voies d'évacuation restent exemptes de fumée en cas d'incendie et continuent à assurer le fonctionnement d'installations vitales pour la sécurité dans les tunnels.

Modes de protection vis-à-vis du feu

Les conduits de câbles pare-feu sont préfabriqués en usine et mis à disposition juste à temps pour être montés. Les conduits de câbles peuvent ainsi être montés en très peu de temps. Etant donné que les couvercles des conduits de câbles pare-feu sont posés sans être fixés, il est facile de rajouter ultérieurement des câbles supplémentaires et de procéder aux contrôles de l'installation.

3.4. Aménagement des voies d'évacuation et de secours

Les plaques de protection contre le feu peuvent être utilisées pour couvrir des cuves en béton à côté de la voie ferrée ou pour couvrir des traverses en bois pour ainsi sécuriser les voies d'évacuation et de secours.

La plaque de protection contre le feu a été conçue pour couvrir des cuves en béton (éventuellement en remplacement des madriers de bois) ou pour aménager des voies d'évacuation et de secours sûres entre les rails. Le béton léger armé de fibres de verre est suffisamment léger pour permettre une pose et un enlèvement rapides avec en plus l'avantage de se prêter facilement et efficacement à la découpe sur le chantier.

Sur demande, la plaque de protection contre le feu peut être pourvue d'un revêtement antidérapant ou phosphorescent pour des domaines d'utilisation particuliers.



Fig12 : Plaques de protection contre le feu à côté de la voie ferrée

3.5. Couvertures de puits pour la protection d'installations de sécurité

Pour protéger les installations de sécurité placées dans les parois de tunnel tels que les coffrets de distribution, les armoires de commande et niches équipées d'un poste d'appel d'urgence, on utilise les couvertures de niche réalisés en plaques de protection contre le feu, en partie plaquées avec de l'acier inoxydable. Cette solution peu encombrante permet d'atteindre une protection incendie durable dans les conditions particulièrement difficiles régnant dans les ouvrages souterrains de circulation .



Fig.13. Couvertures de puits pour la protection d'installations de sécurité

Modes de protection vis-à-vis du feu

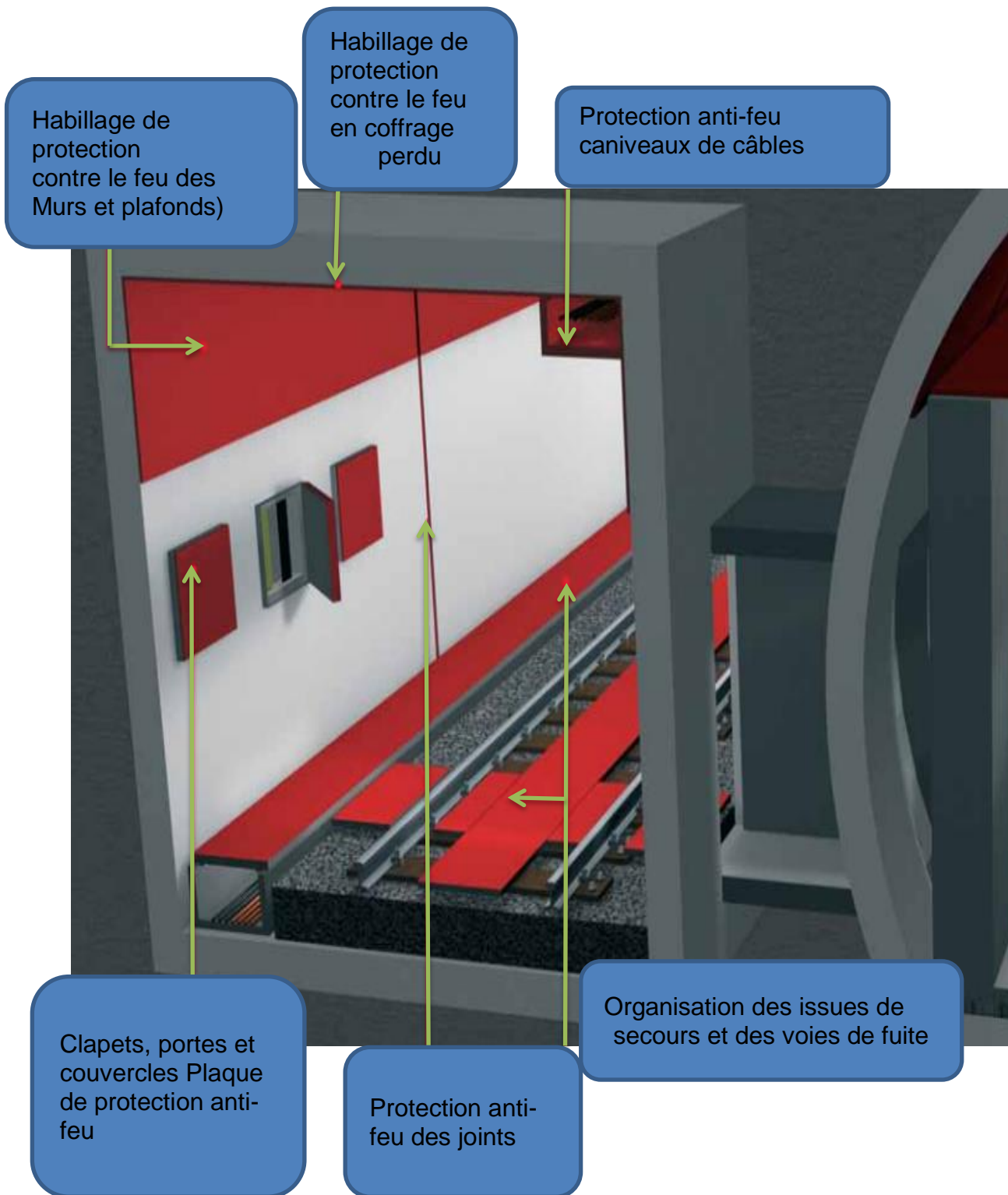


Fig.14.Schéma descriptif de l'utilisation des plaques de protection anti-feu

CONCLUSION

Les sinistres liés à l'incendie dans les tunnels ont incité à une prise de conscience généralisée. En Algérie la réglementation pour la prise en charge de ces problèmes est en projet d'élaboration.

Ce travail nous a permis de comprendre le phénomène du feu et les critères de classification des matériaux et des éléments de structure.

Ce sujet nécessite un approfondissement en particulier concernant les incendies en souterrain.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Guide diagnostic feu CNERIB 2008.

[2] Comportement au feu des tunnels routiers (en ligne) <http://www.techniques-ingenieur.fr>

[3] Protection incendie pour les ouvrages souterrains de circulation routière et ferroviaire (en ligne) www.aestuver.de

[4] Systèmes de protection passive contre l'incendie (en ligne) <http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr>.

**[5] Association internationales des tunnels et des espaces souterrains
(en ligne) <http://www.ita-aites.org/fr>**

[6] Institut des sciences avancés de la sécurité (en ligne) <http://www.esas-institute.com/newfr>.

[7] Autoroutes et tunnels du Mont Blanc (en ligne) <http://www.atmb.com/>

[8] Centre d'études des tunnels (en ligne) <http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr>.